



TESI DOCTORAL

DEPARTAMENT D'ECOLOGIA –FACULTAT DE BIOLOGIA

UNIVERSITAT DE BARCELONA

Programa de Doctorat: Ecologia. Bienni: 1996-1998.

"SITUACIONS D'ANÒXIA EN ZONES ESTUÀRIQUES SENSE FORÇAMENT MAREAL: una aproximació als balanços producció/consum d'oxigen"

Memòria presentada per Xavier de Pedro Puente per optar al títol de doctor per la Universitat de Barcelona, sota la direcció del Dr. Javier Romero Martinengo i del Dr. Jordi Camp Sancho.

Dr. Javier Romero Martinengo
Departament d'Ecologia
Facultat de Biologia
Universitat de Barcelona

Dr. Jordi Camp Sancho
Institut de Ciències del Mar.
Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i
Ambientals, CMIMA-CSIC.
Barcelona

Xavier de Pedro Puente
Barcelona, 25 de setembre de 2007



Copyright 2007 Xavier de Pedro Puente



Alguns drets reservats.

Aquest document es troba subjecte als termes de la llicència de Creative Commons:

“Reconeixement-CompartirIgual 2.5 Espanya” - <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/>

Índex

ÍNDEX

ÍNDEX	vii
Agraïments	xiii
Introducció	3
Antecedents	3
Dèficits d'oxigen dissolt	4
Terminologia.....	4
Conseqüències.....	5
Objectius de la tesi	6
Estructura de la tesi	6
Bibliografia	8
Capítol 1 Hidrodinàmica de la badia dels Alfacs	15
Introducció als moviments d'aigua en estuaris	15
Processos que condicionen la hidrodinàmica.....	15
La importància de l'oscil·lació mareal.....	18
L'efecte del vent.....	18
Els aportos d'aigua dolça.....	19
Objectius del capítol	20
Descripció de l'àrea d'estudi	20
Característiques generals.....	20
Oscil·lació mareal.....	22
L'aigua dels canals.....	23
Metodologia	25
Model de caixes.....	25
Entrades d'aigua dolça.....	29
Mesures directes de fluxos i altres registres.....	29
Origen de les dades meteorològiques.....	30
Evaporació, evapotranspiració i precipitació neta.....	30
Tractament de les dades.....	31
Resultats	34
Fluxos d'aigua entre compartiments.....	34
Oscil·lació mareal.....	34
Corrents d'aigua.....	36
Vent, pluja i pressió atmosfèrica.....	42
Relacions entre variables.....	45
Correlacions dependents d'escala (SDC).....	47
Discussió	52
Components del corrent observat.....	52
Marea astronòmica.....	52
Diferències de densitat.....	53
Influència del vent.....	53
Episodis puntuals d'acoblament entre vent i corrent.....	55
Diferències de pressió atmosfèrica.....	55
A mode de resum.....	56
Apunt final: singularitat hidrica de la Badia dels Alfacs.....	56
Bibliografia	58

Capítol 2	<i>Meteorologia de la badia dels Alfacs i característiques fisico-químiques de la seva aigua durant la dècada dels anys 90</i>	67
Introducció		67
Metodologia		69
Origen de les dades		69
Dades meteorològiques		70
Variables de la columna d'aigua		70
Tractament de les dades		72
Resultats		76
El clima atmosfèric		76
Irradiància subaquàtica		78
Salinitat, temperatura, oxigen i relacions amb altres variables		80
Concentracions de nutrients i clorofil·la a		90
Canals d'entrada		102
Discussió		106
Evolució de la salinitat		106
Comparació amb altres estuaris:		108
Els aportats d'aigua dolça		108
Clorofil·la a i nutrients		109
Canvis físico-químics en la dècada dels 90		111
Bibliografia		115
Capítol 3	<i>Descripció d'un període d'hipòxia</i>	123
Introducció		123
Metodologia		126
Mostreig discret en l'espai i el temps		126
Mostreig continu en el temps		126
Mostreig puntual en el temps i extensiu en l'espai		127
Altres dades		128
Resultats		129
Evolució temporal de l'oxigen dissolt i de l'estructura hidrogràfica		129
Registres en continu		129
Extensió espacial de la hipòxia		136
Diferències entre anys		138
Discussió		142
Possible causa de l'origen de les hipòxies		142
Intercanvi vertical i horitzontal durant la hipòxia		142
Flux no advectioniu i disminució o acabament del procés hipòxic		143
Diferències respecte a altres episodis d'hipòxia coneguts		146
A mode de síntesi		150
Bibliografia		151
Capítol 4	<i>Processos a la columna d'aigua que es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen dissolt</i>	157
Introducció general		157
4.1. El plàncton		159
4.1.1. Introducció		159
4.1.2. Metodologia		160
Treball de camp i de laboratori		160
Tractament de les dades		161
4.1.3. Resultats		161
Canvis nets observats		161

Consum d'oxigen.....	162
4.2. Processos físics.....	164
4.2.1. Introducció	164
4.2.2. Metodologia.....	164
4.2.3. Resultats	166
4.3. La degradació de la matèria orgànica.....	168
4.3.1. Introducció	168
4.3.2. Metodologia.....	168
4.3.3. Resultats	170
Fraccions de carboni i relació amb la DBO.....	170
Clorofil·la a vs. carboni orgànic particulat i oxigen dissolt.....	173
Resultats generals	175
Producció Bruta del Plàncton.....	175
Discussió general	177
Estimes de producció i productivitat del fitoplàncton	177
Estimes de la respiració del plàncton.....	183
Flux d'oxigen a causa del vent.....	183
Consum d'oxigen i canvis en les concentracions de carboni.....	184
Fitoplàncton detrític.....	186
Bibliografia	187
Capítol 5 El paper del bentos i dels seus macròfits.....	195
Introducció general.....	195
Subcapítol 5.A. Canvis en la vegetació submergida de la badia dels Alfacs en la dècada dels 90	189
5.1. Introducció	190
5.1. Metodologia.....	192
Presa i processament de mostres.....	192
Tractament de les dades.....	193
5.1. Resultats	194
Distribució.....	194
Evolució temporal de Biomassa.....	197
5.1. Discussió	198
Biomasses.....	198
Estratègies ecològiques i associacions d'espècies.....	198
Anàlisi de causes possibles	199
Les toxines de les macroalgues.....	201
Importància de la colonització.....	203
Subcapítol 5.B. Metabolisme d'oxigen del Bentos	205
5.2. Introducció	206
5.2. Metodologia.....	208
Corbes Fotosíntesi-Irradiància (F-I) al laboratori.....	208
Càlcul de la irradiància al camp	208
Autoombra de les macroalgues	210
Producció primària de les macroalgues	211
Incubacions in situ.....	212
Simulació dels balanços bentònics a finals d'estiu	213
5.2. Resultats	215

Corbes F-I: paràmetres fotosintètics	215
Extinció de la llum amb la fondària i la biomassa	215
Balanç fotosintètic de les macroalgues	219
Respiració del sediment	220
Balanços del bentos	222
5.2. Discussió	225
Paràmetres fotosintètics	225
Balanços globals de les algues	226
Respiració del sediment	227
Balanços globals del sistema i el paper de les algues	227
Bibliografia	230
Capítol 6 Balanços d'oxigen	241
Introducció	241
Metodologia	244
Origen i tractament de les dades	244
Anàlisi de sensibilitat i discrepància	248
Calibració de paràmetres	252
Resultats	253
Variació estacional del balanç i Balanç Net de l'Ecosistema	253
Variació espacial	254
Variacions globals	254
La situació de pas de l'estiu a la tardor	258
Índex PB:R	258
Sensibilitat i discrepància	258
Discussió	265
Ajust de les estimes d'OD als valors observats: capa del fons	265
Ajust en la capa superficial	266
El cas específic de finals de setembre	266
Contribució relativa dels diferents elements de l'ecosistema en considerar tota la badia en conjunt	270
Comparació dels balanços d'oxigen amb estudis previs	270
Comparació de les contribucions d'oxigen amb les d'altres badies	272
Síntesi de la dinàmica anual de l'oxigen dissolt	274
Estat tròfic	277
Importància de la covariància de factors ecològics per l'aparició d'hipòxies	280
Possibles mesures de prevenció de les anòxies	281
Bibliografia	282
Capítol 7 Conclusions	295
Conclusions (English version)	301
Annex A. Conseqüències de les davallades d'oxigen	311
Conseqüències sobre les característiques físico-químiques de l'aigua	311
Conseqüències sobre la biogeoquímica del sediment	311
Conseqüències sobre els organismes i l'estructura de la comunitat	312
Conseqüències sobre els fluxos d'energia	312
Conseqüències sobre la successió ecològica	312
Conseqüències econòmiques	313
Bibliografia	314
Annex B. Badies i estuaris d'arreu del Món, comentats al llarg de la tesi doctoral	319
Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i Mar Bàltic (Nord d'Europa)	319

Badia d'Àrhus	319
Fiords.....	320
Badia de Chesapeake i els seus subestuaris	322
Estuari del Riu James (Virginia, EUA).....	323
Badia de Tomales (Califòrnia, EUA)	324
Badia de San Francisco	325
Badia de Tampa (Florida, EUA)	325
Estuaris a Austràlia Occidental (Austràlia).....	326
La badia-estuari Peel-Harvey	326
La badia "Wilson Inlet"	327
L'estuari de Palmiet, (Província del Cap, Sud-àfrica)	328
Badia portuària de Tolo (Hong Kong, Xina)	329
Badia d'Uranouchi (Japó).....	330
Bibliografia	332
Annex C. Augmenten les hipòxies?	337
Bibliografia	343
Annex D. "OMMEL: Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons"	349
D.1. Introduction.....	349
D.1.1. Overview	350
D.1.2. Description of Input and Output files	354
D.1.3. Basic description of the main program (for newbies)	359
Prog. main	359
End of program main	360
D.1.4. Editing the source code using free software	360
D.1.5. Compiling the source code using free software	364
D.1.6. Showing the code as html with "Fortran" or "R" mark up.....	366
D.2. Source code.....	367
D.3. Sample input files.....	368
D.3.1. light.in	368
D.3.2. k.in	369
D.3.3. param.in.....	370
D.3.4. biom.in	371
D.3.5. ts.in	371
D.3.6. dboh.in.....	373
D.3.7. ws97h.in.....	373
D.3.8. inflows.in	373
D.4. Sample output files	375
D.4.1. o2masbal.out	375
D.5. "R-project" scripts (*.r) to plot some OMMEL results (*.out)	377
D.6. Bibliography.....	381
D.7. OMMEL Legal Notice.....	382
Annex E. Llistat de Figures	387
Annex F. Llistat de Taules.....	403
Annex G. Nota legal de la tesi doctoral.....	409
G.1. Llicència de Copyright.....	409
G.2. Clàusula d'ús no militar.....	411

Agraiments

Agraïments

Ja ha arribat el moment tan esperat d'estar en situació de poder escriure aquestes línies (el que vol dir que la resta de la tesi ja està llesta). El camí ha estat més llarg del que sembla que ningú no desitjava. Pel camí hem rigut, hem plorat, ens hem mullat (per dalt i per baix), hem viatjat, hem estimat, hem odiat, hem agraït... Hem après. I per descomptat que queden moltes coses per aprendre, tant a nivell científic, com a nivell humà.

Han estat moltes les persones, projectes i institucions per les que em sento agraït, per diferents motius en cada cas.

Les primeres persones per les qui em sento agraït són la Marta (Manzanera), Olga, Pere, Fiona, i Marta Pérez, per l'ajuda amb les campanyes i les hores i hores que hem compartit amb l'excusa de la feina relacionada amb aquesta tesi doctoral. Llàstima que els nostres camins hagin divergit i ara ens sigui més difícil trobar-nos. Quan vaig començar a col·laborar en el departament en el grup de "fanerògams" o "pusidonium", com dèieu, ho vaig fer ajudant a la Marta M. en les seves tasques de recerca. I les estones dels primers mesos amb vosaltres Marta M. i Olga (i amb la Nuri Méndez, poques, per que ja se'n tornava cap a Mèxic als pocs mesos, pero intenses :-)) em van donar l'empenta i el bon rotllo per preparar-me per demanar la beca de tesi en el si del grup de les posidònies, aprofitant el projecte de les anòxies al Delta de l'Ebre. Moments inicials dels quals tinc molt bon record (l'epoca daurada del GEMM: "Grup d'Ecologia de Macròfits Marins", que encara duraria, al meu entendre, uns quants anys més). Un cop la Marta M. va marxar, i després (crec) també la Olga, ja no va ser el mateix. També en formava part del GEMM en Miguel Angel (Mateo), tot i que quan jo vaig començar la tesi ell ja devia estar fent l'estada postdoctoral als Països Baixos. Gràcies Miguel Angel pels intents i la disposició sincera de fer-me un cop de mà amb alguns articles i capítols de la tesi.

També tinc molt bon record d'en Miquel Àngel (Rodríguez) en aquesta etapa inicial, en que també compartíem campanyes a les Medes (per la feina de la tesi de la Marta), i fins i tot potser per alguna campanya en que vas venir al Delta per tasques de la meva tesi? (em dec fer gran, per que ja no ho recordo bé). Posteriorment vaig tornar a conèixer amb ell, i de ben aprop, a Noruega. Li estic agraït per les llargues estones compartides allà, tant per l'ajuda i "feed-back" específic amb els temes de sèries temporals, entre altres, a més de per conèixer algunes estones entranyables amb ell, i en especial durant la visita del meu pare per aquelles terres. Dies gravats a la meva memòria, on sento la teva veu i el teu riure amb plàcids records.

Recordo clarament que en Jordi González em va ajudar en una campanya molt important per mi. Quan el Jordi ho va deixar per anar-se a l'empresa, em va saber molt greu no veure'l més pel departament, doncs ell aconseguia, com alguns altres, que hi regnés molt bon rotllo al seu voltant. I

va ser un plaer que m'acompanyés a l'expedició exploratòria a la "cerca de l'aigua freàtica" de la vora nord de la Badia dels Alfacs.

Per cert, he de dir que de la gent del departament, la Olga se'n porta la palma de ser amb qui més estones he rigut entre "olguismes" i aventures vàries en que hi hem coincidit, juntament amb la Marta, primer, i els anys posteriors sense la Marta també. A més, em vas ajudar (sense saber-ho) a portar millor aquest llarg final de tesi meu, al llarg de les fugaces trobades ocasionals en què ens hem vist durant aquests darrers anys.

Al Javier Romero (el "Javier", a seques, en l'entorn del departament), li agraeixo tot el que he après d'ell i amb ell. Moltes coses a nivell científic i a nivell humà. Ja en conèixer-lo em vaig fixar en ell, per que, a part de la seva excel·lent oratòria i qualitats pedagògiques a l'aula, va ser el primer professor al qual vaig veure portar dolços a classe el dia següent d'un que no va poder venir: havia nascut la seva filla, la Mar, i ens ho va explicar a tota la classe (amb poques paraules però carregades de significat) com qui li explica a un amic; se'l veia tan agraït amb la Vida que feia goig haver estat alumne seu d'aquell any. Era el 1994. Ell és un virtuós de la paraula (tant oral com escrita, i bé ho sabem els que hem vist passar els nostres escrits per sota de les seves incansables traces vermelles de correccions i propostes de millora, tant de "fons" com de "forma"). I ha invertit molts esforços per ajudar a millorar la qualitat de la tesi que aquí es presenta. Malauradament tinc la sensació que no li he sabut agrair prou durant tots aquests anys... (a part de les hores de camp i laboratori aportades, que també han estat moltes). Les meves més sinceres gràcies, Javier.

L'any 1996 vaig fer una estada al Marine Biological Laboratory, amb l'Ivan Valiela. Tot un plaer haver-lo tingut de referent científic durant dos mesos i de tant a prop. Sóc conscient de que vaig ser molt afortunat. Jo encara tenia molts dubtes pel cap, i amb l'excusa del curs sobre processos en ecologia marina al que vaig poder assistir, vaig poder refrescar moltes coses per assentar millor les bases sobre les quals construir algunes de les preguntes que voldria respondre al llarg de la tesi. Ah, i gràcies al Javier i al Paco Comín per facilitar-me el contacte de l'Ivan per fer l'estada. Alhora, gràcies a la Valeria Astorga, per facilitar-me el contacte de la Susie Steinbach, de 86 anys (l'any 1996). Déu meu, com passa el temps, i com he permès que la tesi em fes oblidar el contacte amb persones que m'han marcat en moments determinats de la vida. La Susie, sense gaire vista ja a la seva edat, va ser un referent per les llargues converses sobre la vida i la política als EUA (però no la política dels polítics de la tele, sinó la política del carrer, de les famílies, els diaris, la cuina, la política de la cura per les coses i les persones que t'estimes....). I sé que em va cuidar com si fos un fill seu mentre vaig estar a casa seva a Woods Hole, Massachusetts (EUA).

El 1997 vaig fer la primera de les dues estades de recerca a la Universitat d'Austràlia Occidental. Aquesta va ser al Centre for Water Research, a Perth, de la mà de David Hamilton, fonamentalment, i en concret i a nivell de programació en Fortran, de'n Michael Herzfeld. Els hi estic molt agraïts. Al David, a més, per que primer a través del correu-e, i després en persona, em va saber orientar pels

camins de la modelització numèrica de sistemes dinàmics, a cavall entre el món de l'enginyeria, de la biologia d'organismes, i de l'ecologia aquàtica.

D'aquell mateix any 1997 tinc un especial record del Pere Renom, de nou, amb qui vaig anar al congrés de Sud-àfrica, on presentàvem un poster de la meva feina inicial de tesi, en la qual ell m'havia ajudat quan començava a col·laborar en el grup del GEMM. Aventures i desventures en el congrés, i en els dies posteriors pel "Garden Route" i altres indrets on vam anar per aquelles terres, tant junts, com separats (molt estimulant a nivell paisatgístic, històric, natural i cultural compartir aquells dies amb tu, Piotr). I evidentment, per si no ha quedat prou clar abans, també en totes les nombroses campanyes i experiments de la meva tesi en que has aportat les teves energies, il·lusió i bon humor.

L'any següent, 1998, vaig tornar d'estada a Austràlia Occidental, però aquesta vegada no només a continuar aprenent sobre modelització ecològica amb la gent del Centre for Water Research, sinó a més, per fer una estada al departament de Botànica Marina, en teoria amb la Diana I. Walker, però a la pràctica amb el formidable Gary Kendrick. Gràcies Gary per l'atenció que em vas prestar sempre que et vaig demanar ajuda, tant a nivell professional com a nivell personal. Llàstima que l'experiment que havíem dissenyat de mantenir diverses espècies de macròfits en fosc no va poder incloure's a la tesi doctoral. Així com tampoc totes les dades agafades amb el "PAM Fluorometry" submergible (va ser un honor que confieassis en mi per ser el primer en provar-lo al camp i al laboratori, tot sigui dit). Més dades i resultats que queden en el tinter... A nivell social, els hi estic molt agraït pel caliu humà que vaig sentir a la Margarita Margolles i el Rod Clary, amb qui vaig convida a casa seva en les dues ocasions que vaig estar a Perth, al maquíssim barri costaner de Cottesloe. De llavors també tinc un especial record de la Isabel Ramírez, que també treballava al Centre For Water Research, i amb qui vaig convida també a la mateixa casa. I de l'Adris Zarate, un germà de la Vida descobert en les nostres peregrinacions pel món, i amb qui ens hem anat seguint la pista i veient en paisos diferents durant molts anys. I en especial també vull agrair l'amistat de la Kirsteen, la Kiera Appelhans, el Julian Armstrong, i el Roeland Roelofs. I del Bernie, i la Montse Roura, que vam coincidir també a Perth els mateixos mesos, i vam fer algunes excursions tots tres plegats. I molt agraït també estic dels dies de desconnexió de tesi que al final de l'estada de recerca vaig poder passar a Broome poble i rodalies amb tenda de campanya amb el David Dureau i la seva dona, i posteriorment a Derby, a casa del Sandy i Kevin. Tots dos llocs, a l'àrea tropical de l'Austràlia occidental.

Per últim, l'any 1999 vaig fer una estada (la darrera de la beca FPU) als Països Baixos, casualment al mateix centre que havia estat el Miguel Angel, tot i que jo vaig arribar allà per altres camins molt diferents que no tenen res en comú amb els seus ni amb les fanerògames marines sinó amb la modelització en ecologia. Li estic molt agraïda a la Karline Soetaert per totes les hores de dedicació que em va regalar (i en van ser moltes al llarg de tres mesos!), així com per la seva gran capacitat de trobar i arreglar errors de programació. I en especial vull agrair el caliu humà de'n Peter Herman. Curiosament, ell no tenia per què tutoritzar ni preocupar-se per la meva feina mentre era alla al seu

centre, però ho va fer en diverses ocasions, com qui cuida els detalls de la gent que passa part de la seva vida al centre de recerca on ell també hi treballa. I li estic molt agraït de les estones que em va dedicar. La vida va fer que 5 anys més tard ens tornéssim a trobar a un congrés a Irlanda, i com sempre, les seves paraules van ser molt càlides, i la mirada, de complicitat. De l'estada al NIOO-CEMO en tinc un especial record a nivell humà de les estones compartides amb en Jose Babarro (a més va ser un plaer estar amb ell en classes de Salsa quan va conèixer la dona de la seva vida!), el François, de Marsella, i la Ilona Strelecka.

Així, l'any 2000, un cop acabada la beca FPU, vaig continuar amb la mateixa dedicació a la tesi doctoral que anys previs. I com no veia encara la sortida d'aquest túnel, vaig aprofitar per demanar fer una estada acadèmica curta a Ensenada, Baja California Norte, Mèxic (gràcies a una beca "Intercampus" de la Agencia Espanyola de Cooperació Internacional). Ens vam tornar a trobar amb la Isabel Ramírez, a Ensenada, qui em va mostrar més coses del seu país (mi "Mexico del Norte") i de la Vida. També em vaig trobar de nou amb la Nuri Méndez, qui amablement em va oferir casa seva i el seu temps, mentre vaig visitar el seu centre de recerca a Mazatlan per fer-hi unes xerrades sobre la meva feina de tesi. I l'Héctor Bustos, qui era el tutor de la estada de recerca i docència sobre química oceanogràfica en teoria al Golf de California (i molt més que tutor, no només amb mi i sinó amb tots els altres Intercampus espanyols de l'any 2000 a Ensenada). Amb ell he mantingut relació durant els anys posteriors, i a través seu, amb la seva família, qui ens ha arribat al cor a la Gloria i a mi.

D'aquest moment de l'any 2000, he d'agrair de nou al Javier la seva confiança en les meves capacitats com a docent per facilitar-me la possibilitat de treballar de professor de Biologia a l'escola "Aula, Escuela Europea", on hi vaig estar 5 mesos substituint al Sr. Pere Cairó. Un altra etapa de "temps mort" de la tesis, que em quedà marcada, amb els noms de Sr. Pere Ribera, Sr. Joan Lloró., entre el professorat, i molts alumnes, amb alguns dels quals hem tornat a coincidir. També des de llavors (2000) he vingut donant l'assignatura de "Salut i Medi Ambient", a l'Escola Universitària d'Infermeria de Sant Joan de Déu, on he anat aprenent (a base d'assaig i error) les coses bàsiques per sobreviure en el món de la docència. Ara ja els alumnes em puntuen millor a les enquestes, però em falta moltíssim (si es que podré arribar mai) per a la qualitat dels millors referents docents que he tingut des que vaig fer la carrera: el Miquel Llobera Sande, i com no, el Javier.

I finalment, vaig marxar de "Marie Curie" a Noruega, sota la direcció, en teoria, de Dag Aksnes, però a la pràctica, més sovint sota el guiatge d'Øyvind Fiksen; i una mica també de Jarl Giske i en Jens Nejstgaard. En especial estic molt agraït a l'Øyvind per la tutoria de la feina de la meva tesi, i que amb el seu feedback va evolucionar en les seves darreres passes. També vull agrair l'escalfor creada per tots al voltant dels "cavallers de la taula rodona", amb la Clelia Booman com a secretària incansable de totes les gestions relacionades amb el programa BATMARE que ens acollia als doctorands europeus (a través de les beques Marie Curie de que gaudien per ser centre d'excel·lència de la Unió Europea en recerca sobre ecologia marina). Va ser en els darrers 4 mesos de la meva estada amb ells que vam coincidir el Miquel Angel i jo per aquelles terres, i en concret, taula amb taula en el

mateix despatx fins i tot (qui ens ho hauria de dir :-). Gràcies també als companys de classes de Swing d'aquells mesos, que van fer que els llargs vespres-nits se'm fessin més curts, i hi hagués escalfor interna enmig de la foscor i el fred.

I d'aquesta època vull agrair especialment de nou a en Pere, per que va permetre molt amablement que guanyés el meu primer contracte com a professor a la universitat de Barcelona, el primer d'una sèrie de petits contractes que em van ajudar a obtenir posteriorment l'acreditació de professorat col·laborador, i en darrer terme, el contracte de 4 anys que he estat gaudint fins aquests dies en que diposito la tesi doctoral.

I vull agrair també el suport moral rebut per la gent actual del 3r cicle del departament d'Ecologia i alguns d'ells, també companys com a professorat novell del departament: Biel, Ainhoa, Eusebi, Julio, Manuel, Núria, Tura, Mireia, Blanca, Iraima, Cesc, Salva, Lola, Dani, Mireia, Neus, Rafa, Gonzalo, Jaime, Laia, Enric, ... I abans, el Fede, el Marc i la Teresa, el Rauquirio, l'Andrea (ai! com vam trobar a faltar els partits de futbol quan vas marxar), l'Enrique, el Chechu, el Jose Antonio, el Xavi (Lluch)... Entre el Xavi i la Marta em van ensenyar a fer els primer gràfics amb el "Surfrer"! (eh!, Marta :-) i el Corel Draw. Després, ja em vaig atrevir a continuar d'autodidacta amb aquests i altres programes que els seguirien. En fi, segur que em deixo molta gent, dels d'abans, i alguns dels d'ara: gràcies també per la vostra companyia.

I com no, la gent dels postgraus de docència universitària (la "púrria" del professorat novell de la UB! :-): Biel (de nou :-), Victor, Francisco, Laura, Ivan, Berta, Mònica, Jorge, Marta, Mercè, ... Gràcies per compartir estones i reflexions al voltant de les tasques docents i de recerca com a professors novells i investigadors en formació.

També vull agrair a en Guillem Clapés, que m'iniciés en el tema de treballar també per millorar les condicions laborals del tercer cicle i dels que continuàvem fent tesis doctorals posteriorment. Gràcies a ell em vaig animar a "pringar" pels meus companys dels altres departaments de totes les facultats de Ciències Experimentals i Matemàtiques (l'antiga Divisió III) de la UB, en el seu Consell de Divisió. I d'allà, poc a poc a posar-me en contacte amb gent de la UPC i de l'UAB, per mirar de coordinar esforços de cara a treballar per dignificar la situació de la recerca a Catalunya, especialment en l'etapa de personal investigador en formació. A rel d'allà, es va començar a gestar "D-Recerca", aprofitant l'esforç previ fet per Juan Carlos Bayo i altres en crear Damndocs, la proto-associació per dignificar la situació dels "fotuts doctorands". La llista és llarga, de la gent amb qui em passar moltes hores junts fent reunions, planificant accions com manifestacions, tancades a universitats i centres de recerca, manifestos i cartes de recollides de signatures, ... i per que no, festes i celebracions vàries: Edu, Cesca, Marc, Octavi, Teresa, Ana, Héctor, Miquel (de Cáceres) i Miquel (Tusón), Jaume, Fede, ... I a nivell de tot l'estat espanyol (Federación de Jóvenes Investigadores – FJI/Precarios): Pastora, Roberto, Cesar, Toni (Galardón? :-), Marta, Cristina, Andrés, Raul ("Sólo se pierde la lucha que se abandona"), I si, al llarg d'aquests anys, s'han aconseguit moltes coses que no ens pensàvem, per

als propers doctorands que van venir després i que venen ara: pujada de sous de 100.000 a 160.000 ptes, contractes per als darrers dos anys de període finançat com a investigadors predoctorals (2 beca + 2 contracte), i després, en alguns casos, 1 beca + 3 contracte. L'estatut del personal investigador en formació, que després de tants anys, retorna els seus fruits fent que les universitats finalment hagin de reduir les hores de docència dels seus becaris de recerca i docència (o similars) a 60 hores a l'any (se'ls va acabar allò de fer servir els becaris com a professorat barat per cobrir la docència de les universitats). Contracte d'ajudant no doctor per 4 anys (en teoria ;-) amb només 60 hores de classes a l'any. És curiós el que hem après al llarg d'aquests anys de la tesi doctoral, de tasques relacionades més amb la gestió de la ciència, el disseny de la carrera investigadora, la política científica (la de grans reunions i comissions, i la de petites trobades de passadissos i dinars de treball en petit comitè). Gràcies també al Marius Rubiralta, i al Miquel Moretó, ambdós com a anteriors vicerectors de recerca de la UB, per confiar en les iniciatives que portàvem endavant doctorands de la UB per millorar les nostres condicions laborals i dels nostres companys.

Bé, em falta per donar l'agraïment al tècnic de la comunitat de regants de l'Hemidelta dret (no recordo el seu nom, i no me'l va posar en els arxius de dades que encara conservo), al Jordi Cunillera i Grañó, tècnic del Servei de Meteorologia, per facilitar-me dades i orientacions sobre les estacions meteorològiques del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya. I dels serveis científico-tècnics de la UB, voldria agrair en especial a la Laia i la Pilar Teixidor, per que van tenir prou paciència amb la gent nova (i "novata") com jo. I a l'Isidre, per ser un exemple d'excel·lent combinació de parsimonia, rigor científic i tècnic i bon suport amable a investigadors novells.

Gràcies mil al Jordi Camp per la seva constant disposició a ajudar-me en tot allò relacionat amb la tesi doctoral. Primer, com a co-investigador principal del projecte de les anòxies, juntament amb el Javier. I després, com a co-director, en acceptar la proposta que li vaig fer, amb el vist-i-plau del Javier. Vull agrair també l'ajuda rebuda per part de la gent de l'ICM en els primers anys de campanyes (sobre tot, la Mercedes Masó), i del Maxi Delgado en assessorar-me diverses vegades per correu-e sobre el fitoplàncton a la badia dels Alfacs.

Gràcies també a l'Albert Solé Sabaté, per les seves pautes clares i ràpides per ajudar-me a aprendre a compilar exitosament el meu codi fortran sota programari lliure (GNU Fortran). No et pots ni imaginar Albert, el que em va suposar la teva ajuda, després de més de dos anys de no saber per on encarar el tema per aconseguir-ho, un cop ja havia entès la importància de poder alliberar el codi amb programari lliure, i que fos compilable també amb eines lliures com les del projecte GNU.

Indirectament em sento molt agraït també amb totes les persones de les comunitats de programari lliure que han desenvolupat o documentat les següents eines que per una o altra raó he emprat en algun moment per realitzar aquesta tesi doctoral:

- Entorn de programació i utilitats per gestionar codi font: GNU Fortran, Source-highlight,
- Visualització de dades: R-project, RKWard, SciViews
- Dibuix vectorial: Inkscape, OpenOffice Draw

- Edició d'imatges: GIMP
- Generació de pdf: OpenOffice, PdfCreator.
- Sistema operatiu: GNU/Linux, Ubuntu, Fedora, Slax
- Internet i correu-e: Firefox, Thunderbird, Mozilla SeaMonkey

Gràcies també per la paciència amb mi durant aquest temps (llarg) de "*estic en procés d'acabar la tesi doctoral*". Gràcies als meus pares, germans i resta de família, als companys de Sant Pau del Camp (Paloma, Agus, Oscar, Ana, Chema, Imma, Ernest, Maya, Yolanda, Rosa, Xavi Gine, les quatre Martes, ...), la gent de Sant Pere Claver (Josemi, Carme, Maite, Jordi, Pep, David, Dani, Jaime, Albert...). I a la gent del Camp de treball (què feu llegint aquesta tesi! Lo vostre és moral...: Carles, Laia, Mariajo i Mikel, Unai, Marta, Laura, Susana, Andreu, Angels, Bet, Ester i Erik, Montse i Eneko...). I tota la gent de "diàspora" que en un o altre moment us preocupàveu per l'evolució de la meua tesi doctoral. Us he de confesar que durant molts anys he perdut la iniciativa de quedar per xerrar una estona per que, en part, em feia pal haver de tornar a passar un cop més (durant anys) per que em preguntéssiu per la tesi doctoral, i haver de respondre el de sempre "*No, encara no; ja falta poc, però encara falta, sembla*"... Sembla mentida com m'ha influït això en el meu caràcter d'ençà que es va acabar la beca però no la tesi....

No voldria acabar sense agrair també a les institucions pel finançament rebut. Al Ministeri d'Educació i Ciència, per la beca de "Formació de Professorat Universitari" - FPU, entre 1996 i 1999. A la Universitat de Barcelona per la borsa de viatge per assistir a un Congrés a Sud-àfrica el 1997. A la Unió Europea, per la beca Marie Curie rebuda per fer una estada de recerca a Noruega durant 7 mesos el 2002. I a la Generalitat de Catalunya pel finançament per assistir a una edició de les Jornades Doctorials de Catalunya de 2007.

Ara si, per acabar, vull agrair l'enorme paciència i carinyo que la Gloria ha tingut amb mi durant els darrers anys que portem junts i jo he estat "missing" de forma física i psicològica per causa de la tesi. Per sort, com més temps ha passat, més ha entès el molt que significava per a mi (sobretot psicològicament) arribar al final de la tesi. Moltes són les coses que vaig deixar aparcades els primers anys quan em vaig quedar sense beca, per tal de poder dedicar-me al màxim de cos i cap a enllestir la tesi com abans millor. I des de principis de 2003, ja van ser moltes menys les coses que vaig deixar aparcades (just després ens vam conèixer), però tot i així, sempre he tingut un remanent al cap que m'ha pesat molt anímicament. Gràcies Gloria per creure també en mi i acompanyar-me en tot aquest procés, que de vegades ha estat dur, i altres, molt enriquidor i festiu per als dos.

Introducció

Introducció

Els sistemes estuaris són dominis d'aigua costanera semiconfinada, que tenen una connexió lliure amb el mar, i on l'aigua de mar es dilueix amb l'aigua dolça procedent del desguàs continental (Pritchard 1952, Pritchard 1967, Cameron i Pritchard 1965). En ells existeix confluència de matèria i energia de diferents orígens, que dona lloc a l'existència de forts gradients i ecotons, així com una alta variabilitat en les condicions ambientals (Ketchum 1983a). Per això presenten característiques afins, en part, a totes dues zones que els limiten geogràficament, a part d'altres peculiaritats pròpies. Algunes d'aquestes peculiaritats pròpies són comuns a tots els estuaris arreu del món, com la seva alta producció biològica respecte la majoria d'altres sistemes de la Terra; altres peculiaritats són específiques per les condicions locals d'aquell indret en concret (Ketchum 1983b, Valiela 1995).

La Badia dels Alfacs és un sistema estuarià influït per l'absència de mareas notables, com passa en alguns altres sistemes estuaris mediterranis del món. El present treball s'emmarca en la línia de tota una sèrie de treballs realitzats en aquesta badia, per tal de conèixer millor la seva dinàmica, les similituds i diferències respecte altres sistemes estuaris del món, i molt especialment esbrinar els mecanismes que controlen les concentracions d'oxigen dissolt i les seves fluctuacions.

Antecedents

L'any 1984 es va encetar un programa d'estudi de Delta de l'Ebre com a sistema integrat d'ecosistemes terrestres, d'aigua dolça, salabrosa i marina, per tal de començar a establir relacions quantitatives de fluxos de matèria entre ells i estimar les produccions de cada sector ("Estudio integrado del delta del Ebro. Factores determinantes de la producción biológica". CICYT-PAC 84-0016-C02). S'han publicat, des de llavors, algunes tesis sobre aspectes relacionats amb el Delta de l'Ebre (Ibáñez 1993, Carrillo 2002 i Movellán 2004, sobre diferents aspectes físics o químics del tram estuarià de l'Ebre; Muñoz 1990, sobre la limnologia de la part baixa de l'Ebre i els canals de rec; Forés 1989, Astorga 1998, Novella 1998 i Peña 2003, sobre diferents aspectes relacionats amb els arrossars; Menéndez 1990, sobre macròfits submergits de llacunes costaneres i García 2001 sobre els seus sediments; Arcos 2001 sobre ocells i pesqueres) i altres més específics en la Badia dels Alfacs (Delgado 1986, sobre el fitoplàncton; Pérez 1989, sobre les fanerògames marines; Martínez 1990, sobre les macroalgues; Vidal 1991, sobre la interfase sediment - aigua; Camp 1994, sobre la dinàmica ecològica integrada de la badia; i Garcés 1998, sobre el plàncton tòxic).

Des dels primers estudis fins als darrers, s'han vingut observant alguns fenòmens de dèficit d'oxigen dissolt a la part més interior i profunda de la badia dels Alfacs (Camp 1994). Una de les hipòtesis inicials contemplava que el bentos del cos central de la badia era en conjunt consumidor net d'oxigen, i que part de la matèria orgànica produïda per macròfits marins a les plataformes podia descompondre's a prop o a dins del cos central de la badia (J. Camp, *com. pers.*). Aquests factors juntament amb les altes temperatures estivals, baixa freqüència de fronts atmosfèrics amb capacitat de barrejar la columna d'aigua i polsos productius del fitoplàncton podien potenciar les desaparicions

locals d'oxigen a la capa fonda. Amb aquest marc conceptual es va iniciar el projecte de recerca de la CICYT en el qual s'emmarca la present tesi: "Episodios de Anoxia en bahías estuáricas mediterráneas: generación, mantenimiento y consecuencias" (AMB95-0171-C02-02). En realitzar les primers campanyes vam observar que la badia estava coberta per macroalgues bentòniques, i a mesura que vam repetir més campanyes en mesos successius vam poder constatar que no eren acúmuls puntuals de macroalgues arrossegades pels corrents, sinó que aquestes es trobaven de forma permanent a la badia, i que fins i tot presentaven unes cobertures pràcticament totals del seu fons. Des de llavors, vam incloure les macroalgues en el punt de mira de les nostres investigacions, atès que el seu paper podia haver passat de ser marginal en anys previs a fonamental per entendre la dinàmica de l'oxigen de l'ecosistema en el final dels 90.

Dèficits d'oxigen dissolt

En aquest treball s'han fet servir conceptes com "hipòxia" o "anòxia" per referir-se a situacions de dèficit d'oxigen dissolt a l'aigua. Convé aclarir des del principi quan parlarem dels primers i quan dels segons, i quines són les característiques principals i conseqüències que poden tenir aquests dèficits en sistemes marins costaners, que poden anar des de les petites modificacions biogeoquímiques en hipòxies lleus, fins els canvis substancials a mig/llarg termini en l'ecosistema en casos d'anòxies severes i persistents.

Terminologia

Hipòxia significa, estrictament, les condicions de concentració d'oxigen menors que les de saturació amb l'aire, altrament anomenades condicions de "normòxia" (Jørgensen i Richardson 1996). A la pràctica, el terme hipòxia s'assigna a valors en el rang baix de concentracions d'oxigen dissolt (OD), com valors inferiors a $3 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$ (Turner i Allen 1972, May 1973, Kuo i Neilson 1987, HELCOM 1990), o a $2 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$ (Foote 1983, Stuntz *et al.* 1982, Pokryfki i Randall 1987, Breitburg 1990, Summers i Engle 1993, Bierman *et al.* 1994, Dortch *et al.* 1994), a causa d'efectes demostrats sobre la fauna sota aquestes concentracions (Pihl *et al.* 1991).

Pel contrari, "anòxia" ha estat tradicionalment assignada a condicions de $0 \text{ mgO}_2 \text{ l}^{-1}$, tal i com el seu nom fa referència (*an-* *oxia*, és a dir, sense oxigen). No obstant, la literatura està plena de criteris lleugerament diferents segons els autors per acotar els límits d'aquests dos conceptes, alguns dels quals es comenten a continuació.

Diaz i Rosenberg (1995) van considerar a la seva revisió els dos termes hipòxia i anòxia per definir ambients amb poc oxigen. Aquests són els termes més àmpliament utilitzats a la literatura ecològica i fisiològica. Ells consideren que hipòxia comença a 2.0 ml l^{-1} d'oxigen (2.8 mg l^{-1}) i s'estén fins a 0.0 ml l^{-1} , el punt d'anòxia ¹. Per habitats marins o estuaris les concentracions més freqüents d'oxigen

¹ Equivalències aproximades per comparació amb altres unitats d'oxigen, a 20 psu (practical salinity units, equivalent aproximadament a g l^{-1} ó ‰), 25°C i 1 atmosfera de pressió: $1 \text{ ml l}^{-1} = 1.4 \text{ mg l}^{-1} = 1.4$

dissolt oscil·len entre lleugerament per sobre de 100% de saturació (prop de 8-10 ml l⁻¹), i per sota de 40% (fins a 2.0 ml l⁻¹). Per a la seva revisió ells consideren aquest rang com a normòxia. Malgrat això, ells defineixen uns rangs de valors específics més detallats pel que fa a la successió de comunitats bentòniques i la seva variabilitat (Figura 0.1).

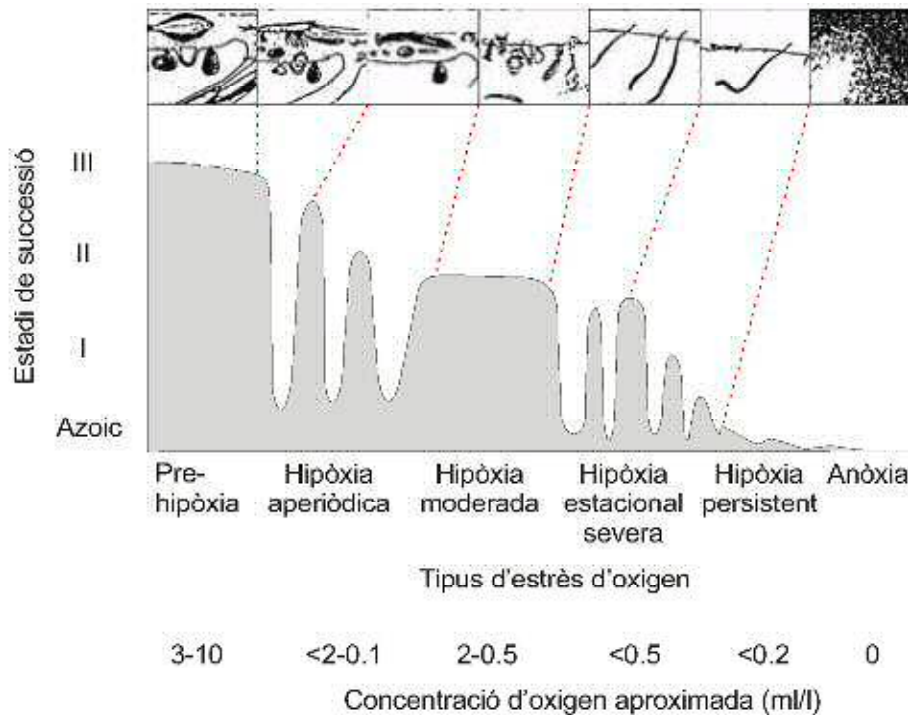


Figura 0.1 Model conceptual sobre com interacciona la hipòxia amb els estadis de successió o la complexitat de l'organització de la comunitat (modificat a partir de Diaz i Rosenberg 1995). L'estadi III és una comunitat madura, l'estadi II és una comunitat transitòria i l'estadi I una comunitat pionera o oportunista (estadis de successió segons Rhoads i Germano 1986). L'escala de temps és relativa, amb l'interval de temps per a la davallada progressiva de l'ecosistema essent dependent del sistema, però els sistemes estudiats per Diaz i Rosenberg (1995) segueixen aquest mateix patró general.

Pel que fa referència a la present tesi doctoral, es va considerar anòxia de 0 a 1 mg l⁻¹ i hipòxia d'1 a 3 mg l⁻¹, per ser aquest el valor sencer més proper en mg l⁻¹ al de la revisió de Diaz i Rosenberg. Com l'esgotament d'oxigen no segueix una caiguda lineal sinó una evolució exponencial negativa en els valors més baixos de concentració d'oxigen, considerem arbitràriament que quan l'oxigen dissolt arriba a valors sota 1 mg l⁻¹, ja pot ser considerat pràcticament com un episodi anòxic en el sistema.

Conseqüències

Els esgotaments parcials o totals d'oxigen poden tenir un impacte significatiu tant en aspectes purament ecològics com en sectors socio-econòmics. Des de l'òptica ecològica trobem una sèrie de repercussions que, tot i que depenen tant de la seva freqüència d'aparició com de la seva intensitat, afecten en general a les característiques físico-químiques de l'aigua, a la biogeoquímica del sediment,

ppm = 23.9 mm Hg = 23.9 torr = 3.18 kPa = 45.7 mM = 89.3 mg-at l⁻¹ = 4.3 %O₂ vol. = 14 % a saturació amb l'aire.

a les poblacions d'organismes i l'estructura de la comunitat, i també als fluxos d'energia de l'ecosistema i a la successió ecològica (veure "Annex A. Conseqüències de les davallades d'oxigen").

Objectius de la tesi

Tenint en compte tot l'exposat anteriorment, l'objectiu general de la tesi és entendre millor la dinàmica d'oxigen dissolt de la badia dels Alfacs, com un exemple de badia estuariana sense mareas importants, per tal d'esbrinar quines poden ser les causes de les davallades d'oxigen esporàdicament detectades en aquesta badia. A l'hora, es pretén conèixer el grau d'importància de cadascuna d'aquestes causes per modificar la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua. Entre les causes possibles es troben les relatives a canvis en la hidrodinàmica de les masses d'aigua de la badia, o bé a canvis interanuals d'algunes característiques físico-químiques de l'aigua (temperatura, salinitat, regim lumínic, concentracions de nutrients, ...), a la seva vegada, potencialment relacionades amb possibles canvis de la climatologia en els darrers anys (temperatura, irradiància, vent, ...). I la causa pot estar relacionada amb canvis, a l'hora, de les poblacions d'organismes (plàncton, bentos, ... especialment els fotosintètics, malgrat no només).

Com a objectius secundaris es troben entendre millor el paper dels aportos d'aigua dolça i el vent a la badia per contrarestar els efectes d'eventuals balanços d'oxigen negatius a causa dels organismes, descriure amb més detall un fenomen d'hipòxia a la badia, i situar la badia dels Alfacs en un context més ampli d'estuaris o badies estuarianes d'arreu del món.

Estructura de la tesi

Així, els objectius esmentats van portar a estructurar la tesi de la següent manera. En el Capítol 1 es fa un repàs de les qüestions importants sobre la **hidrodinàmica** de badies i estuaris, i s'analitzen algunes de les **característiques específiques de la badia dels Alfacs** en aquest àmbit, que poden tenir molta influència sobre l'aparició (o finalització) de les davallades d'oxigen.

Convé saber també si aquestes alteracions dels valors normòxics poden ser conseqüència d'algun canvi subjacent de les **condicions climatològiques** de la badia així com d'una possible evolució de les **característiques físico-químiques de l'aigua** de la Badia de l'última dècada. Aquests aspectes són abordats en el Capítol 2.

Els períodes hipòxics de la Badia dels Alfacs s'han pogut descriure poques vegades amb prou dades de camp. La primera vegada (detectada) va ser el 1990 en què es va descriure amb certa cobertura espacial l'aparició, evolució i acabament d'un període d'hipòxia de la badia, però encara amb algunes llacunes sobre l'evolució temporal més fina d'aquesta davallada, per exemple. Durant l'any 1997 es va poder cobrir una segona **descripció detallada d'un episodi d'hipòxia** amb la distribució espacial i la cobertura temporal a escala fina, i això queda recollit en el Capítol 3.

Ara bé, un cop ja sabem com són els episodis d'hipòxia, caldrà veure quin paper tenen el metabolisme d'oxigen del plàncton i del bentos en la badia. L'ordre de magnitud de la **contribució del plàncton i altres processos de la columna d'aigua** s'analitza en el Capítol 4, a partir de dades bibliogràfiques, mesures de camp de canvis diaris de concentració d'oxigen en la columna d'aigua i mesures de laboratori de DBO_5 . El **bentos**, per altra banda, s'analitza en el Capítol 5, posant especial atenció al paper de les **macroalgues bentòniques** en el balanç d' O_2 de l'ecosistema després de la seva colonització del fons de la Badia durant l'última dècada.

Finalment s'ha integrat molts dels resultats previs en el Capítol 6 per fer càlculs de **balanços d'oxigen globals de l'ecosistema** a escala mensual o superior, a través d'un model numèric desenvolupat en el marc de la present tesi (OMMEL, Annex D). Amb aquesta eina de càlcul de balanços s'han investigat les contribucions parcials dels diferents components físics i biològics de l'ecosistema per un costat, i del plàncton i del bentos, per l'altre. Això ha servit alhora, per fer una anàlisi comparativa i elucidar la diferent sensibilitat de l'ecosistema a canvis en alguns dels paràmetres ambientals, amb especial èmfasi en el període d'hipòxia observat el 1997.

I per acabar, s'ha fet un **resum sintètic de les conclusions** més importants (Capítol 7) que es poden extreure de cada capítol, incloent algunes de les qüestions no resoltes importants que poden donar lloc a un treball posterior de recerca.

Bibliografia

- Arcos, J. M., 2001. Foraging Ecology of Seabirds at Sea: Significance of Commercial Fisheries in the NW Mediterranean. Ph.D., pp., *Biologia Animal*, Barcelona.
- Astorga, V., 1998. La desnitrificación en humedales mediterráneos: el Delta del Ebro. Ph.D., 228 pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Bierman, V. J. J., *et al.*, 1994. A preliminary Mass Balance Model of Primary Productivity and Dissolved Oxygen in the Mississippi River Plume/Inner Gulf Shelf Region. *Estuaries*, 17 (4): 886-899.
- Breitburg, D. L., 1990. Near shore hypoxia in the Chesapeake Bay: patterns and relationships among physical factors. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 30 593-609.
- Cameron, W. M. i Pritchard, D. W., 1965. "Estuaries", a *The Sea, II*, pp. 306-324. Wiley and Sons, New York.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Carrillo, J. A., 2002. Influencia de la turbulencia y de la Dinámica de Interfases de Densidad sobre Organismos Planctónicos."Aplicación al estuario del Ebro". Ph.D., pp., *Enginyeria hidràulica marítima i ambiental*, Politècnica de Barcelona.
- Delgado, M., 1986. Ecología de diatomeas costeras. Relación Pláncton-Bentos. Doctoral, 261 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.
- Dortch, Q., *et al.*, 1994. Respiration rates and hypoxia on the Louisiana shelf. *Estuaries*, 17 (4): 862-872.
- Foote, K., 1983. Observations of oxygen depletion in Louisiana Offshore Waters. *3rd Annu. Gulf Mex. Inf. Transfer Meeting*: 185-186.

-
- Forés, E., 1989. Cicles del nitrogen i del fòsfor en el sistema dels arrosars del delta de l'Ebre. Ph.D., pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Garcés, E., 1998. Proliferacions de dinoflagel·lades a la Costa Catalana: estudi del creixement *in situ* i adaptacions per al manteniment. 269 pp., *Departament d'Ecologia*, Universitat de Barcelona.
- García, M. C., 2001. Papel de la interfase sedimento-agua en el reciclado de nutrientes en zonas húmedas. Ph.D., pp., *Ecologia*, Barcelona.
- HELCOM, 1990. Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea 1984-1988. *Balt. Sea. Envir. Proc.*, 35B: 432.
- Ibáñez, C., 1993. Dinàmica hidrològica i funcionament ecològic del tram estuari del riu Ebre. Tesi doctoral, pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Ketchum, B. H., 1983a. Estuaries and enclosed seas. *Ecosystems of the world*, 26: XII, 500 s.
- Ketchum, B. H., 1983b. "Estuarine characteristics", a *Estuaries and Enclosed Seas*, 26, 1-14. Elsevier, Amsterdam.
- Kuo, A. Y. i Neilson, B. J., 1987. Hypoxia and salinity in Virginia estuaries. *Estuaries*, 10 (4): 277-283.
- Martínez, A., 1990. Estudio ecológico de las algas efemerofíceas: papel en los flujos de materia y energía en un sistema estuárico (Bahía de los Alfaques, Delta del Ebro, España). Ph. D. Thesis, 166 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- May, E. B., 1973. Extensive oxygen depletion in Mobile Bay, Alabama. *Limnol. Oceanogr.*, 18 353-366.
- Menéndez, M., 1990. Ecología de los macrófitos enraizados sumergidos en la laguna de la Tancada (Delta del Ebro, NE. España). Ph.D., 240 pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Movellán, E., 2004. Modelado de la cuña salina y del flujo de nutrientes en el tramo estuarino del río Ebro. Ph.D., pp., *Ecology*, Barcelona.
- Muñoz, I., 1990. Limnología de la part baixa del riu Ebro i els canals de reg: els factors físico-químics, el fitoplàncton i els macroinvertebrats bentònics. Doctoral, pp., Barcelona.

- Novella, E., 1998. Reciclat dels residus agrícoles en els arrossars del delta de l'Ebre: aproximació a una agricultura sostenible. Ph.D., 296 pp., *Ecologia*, Barcelona.
- Peña, s., 2003. Estudio y modulación del metabolismo del glutatión en la tolerancia al estrés oxidativo generado por plaguicidas en organismos acuáticos de interés comercial. Ph.D., pp., *Bioquímica i biología molecular*, Valencia.
- Pérez, M., 1989. Fanerógamas marinas en sistemas estuáricos: producción primaria, factores limitantes y algunos aspectos del ciclo de nutrientes. Doctoral, pp., Barcelona.
- Pihl, L., *et al.*, 1991. Effects of periodic hypoxia on distribution of demersal fish and crustaceans. *Mar. Biol.*, 108 349-360.
- Pokryfki, L. i Randall, R. E., 1987. Nearshore hypoxia in the bottom water of the Northwestern Gulf of Mexico from 1981 to 1984. *Mar. Environ. Res.*, 22 75-90.
- Pritchard, D. W., 1952. Estuarine hydrography. *Adv. Geophys.*, 1 243-280.
- Pritchard, D. W., 1967. "Observations in circulation of coastal plain estuaries", a *Estuaries*, 83, 37-44. Am. Assoc. Adv. Sci.,
- Rhoads, D. C. i Germano, J. D., 1986. Interpreting long-term changes in benthic community structure: a new protocol. *Hydrobiologica*, 142 291-308.
- Stuntz, W. E., *et al.*, 1982. Area of hypoxic bottom water found in the Northern Gulf of Mexico. *Coastal Oceanography and Climatology News*, 4 37-38.
- Summers, J. K. i Engle, V. D., 1993. Evaluation of sampling strategies to characterize dissolved oxygen conditions in northern Gulf of Mexico estuaries. *Environ. Monit. Assess.*, 24 (3): 219-229.
- Turner, R. E. i Allen, R. L., 1972. Bottom water oxygen concentration in the Mississippi River Delta Bight. *Contr. Mar. Sci.*, 25 161-172.
- Valiela, I., 1995. Marine Ecological Processes:
- Vidal, M., 1991. Estudios sobre la dinámica de nutrientes en sistemas estuáricos: flujos de sedimento-agua de nutrientes y oxígeno. Ph. D., 305 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.

**Capítol 1. Hidrodinàmica de la badia dels
Alfacs**

Capítol 1 . Hidrodinàmica de la badia dels Alfacs

Introducció als moviments d'aigua en estuaris

El moviment de l'aigua és un aspecte crucial per als sistemes de barreja o de frontera entre aigua continental i aigua marina com són els estuaris. Tot i que el coneixement detallat de la hidrodinàmica d'un estuari és tasca molt complexa (Proudman 1953, Pond i Pickard 1978, Officer 1983, Cushman-Roisin 1994), podem dividir el moviment de l'aigua en moviment net (transport advectiu) i en intercanvi turbulent sense desplaçament net de la massa d'aigua (difusió turbulenta o barreja). Aquesta divisió ens permetrà abordar de manera més senzilla els termes més rellevants de la hidrodinàmica de la badia dels Alfacs pel que respecta als balanços d'oxigen de la columna d'aigua, i entendre així de quina manera influeix la hidrodinàmica de la badia dels Alfacs en la generació, manteniment o finalització de les hipòxies que en ella han aparegut algunes vegades.

Així doncs, l'objectiu d'aquest capítol és fer un breu resum del que se sap d'hidrodinàmica estuariana, presentar les característiques generals del lloc d'estudi i, molt especialment, el seu hidrodinamisme, intentant una aproximació quantitativa als principals fluxos d'aigua, avaluant el grau d'influència de cadascuna de les forces que hipotèticament poden afectar a aquest moviment. Aquesta quantificació dels fluxos d'aigua permetrà en capítols posteriors analitzar els seus efectes sobre els balanços d'oxigen dissolt de la columna d'aigua.

Processos que condicionen la hidrodinàmica

Podem dir que en general existeixen tres causes fonamentals que generen els moviments de masses d'aigua en un sistema estuarià: la marea, el vent i les ones que genera, i les diferències de densitat (Hearn 1995 i Friedrichs 2002a).

Els corrents mareals són produïts per l'oscil·lació de l'alçada de la columna d'aigua tant a causa de l'atracció dels astres (marea astronòmica) com a causa de la pressió atmosfèrica (marea baromètrica). Els corrents produïts pel vent són generats per aquest en bufar constant sobre la superfície de l'aigua durant suficient temps. Les ones produïdes pel vent juguen un rol important en estuaris amplis i afecten la hidrodinàmica. Els corrents produïts per diferències de densitat, altrament anomenats corrents gravitacionals o baroclínics, són creats per diferències de pressió a causa dels gradients de densitat que generen fluxos mitjans en la direcció horitzontal. Solen estar lligats a entrades d'aigua dolça continental que generen gradients horitzontals de densitat i a evaporació diferencial.

Des del punt de vista hidrodinàmic, la resultant d'aquests processos (o el seu comportament al llarg del temps) permetrà caracteritzar l'estuari, malgrat existeixen moltes altres maneres de classificar els estuaris (Pritchard 1952, Hansen i Rattray 1966, Elliott 1976 , Dalrymple *et al.* 1992, Dyer 1997).

Segons la classificació a partir del seu grau d'estratificació vertical, els casos extrems d'estuari que existeixen són l'estuari completament barrejat i l'estuari amb falca salina o estratificat, amb tota la gama de variants i casos intermedis d'estuaris barrejats parcialment (Pritchard 1955, Cameron i Pritchard 1965).

Un cas especial és el dels fiords, pel seu singular funcionament basat en una estructura de tres capes, generalment, en els molts centenars de metres de fondària que poden arribar a tenir. Presenten una capa superior que rep els aportos d'aigua dolça superficials, una capa intermèdia on l'aigua salada de mar obert té influència de la capa menys salada superficial, i una capa inferior d'aigua totalment salada que pot romandre confinada sense intercanvi amb cap de les capes superiors ni amb mar obert durant anys (Figura 1.1). Aquesta tercera capa confinada es renova quan la massa d'aigua salada de mar obert aconsegueix sobrepassar el petit monticle o ressalt vertical que existeix a l'entrada del fiord i lliscar per gravetat sobre el sediment fins barrejar-se amb l'aigua de la tercera capa. La bicapa superior del fiord funciona com un estuari parcialment barrejat dels descrits anteriorment, i el conjunt de la capa intermèdia i la inferior equivaldrien a un estuari amb falca salina.

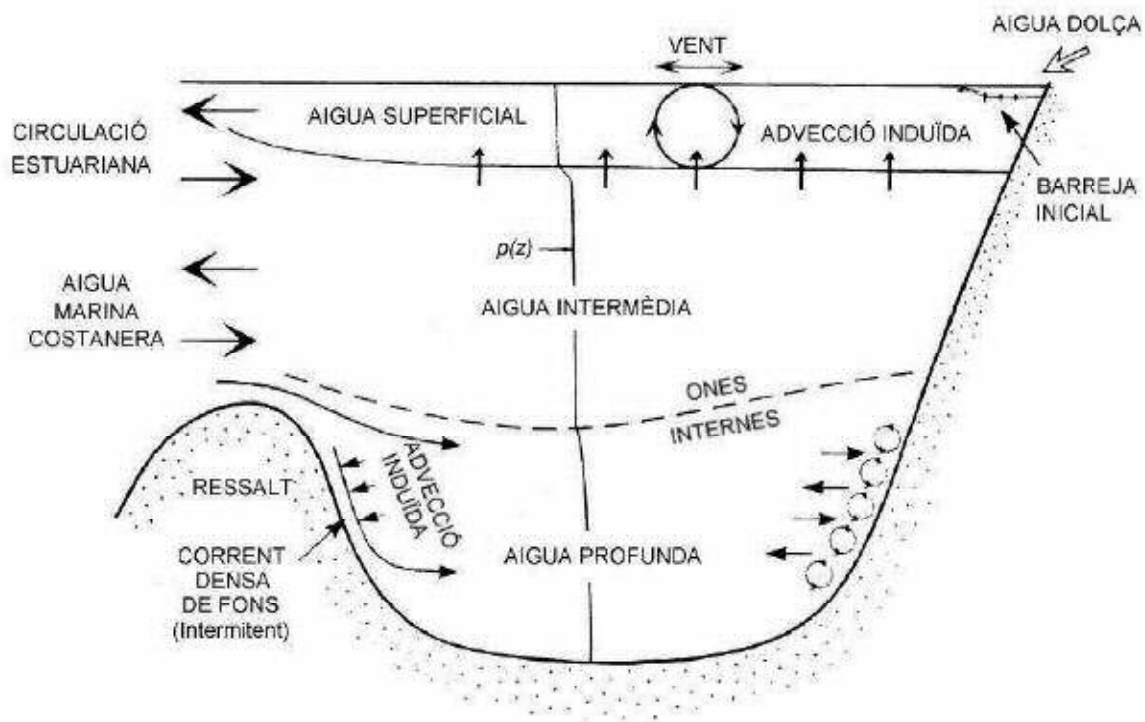


Figura 1.1 Esquema d'un fiord (modificat a partir de Stigebrandt 2001).

La importància de l'estratificació és clau en el context que ens ocupa atès que limita la renovació de la massa d'aigua del fons així com l'intercanvi d'oxigen amb la massa superficial en contacte amb l'atmosfera.

Un resum sintètic d'aquests patrons de circulació estuariana es pot trobar en la Taula 1.1.

Taula 1.1 Resum de circulació estuariana per als diferents tipus d'estuaris¹ (segons classificació de Pritchard 1955, Cameron i Pritchard 1965; modificat a partir de Friedrichs 2002b).

	Falca Salina	Parcialment barrejat	Totalment barrejat
Barreja vertical	Mínima	←-----→	Màxima
<i>Aigua dolça</i>	Majoria	Moderada	Mínima
<i>i/o marees</i>	Febles	Moderades	Fortes
<i>i/o canals</i>	Màxima fondària	Moderada	Mínima
Intercanvi vertical			
<i>Picnoclina</i>	Si, aguda	Si, dispersa	No
<i>Intercanvi vertical d'O₂</i>	Mínim	Petit	Abundant
<i>En tots tres casos: més aigua dolça causa enfortiment de la picnoclina i reducció de l'intercanvi vertical d'O₂</i>			
Intercanvi horitzontal			
<i>Flux de fons</i>	Feble cap a terra	Fort cap a terra	Feble cap a mar (generalment)
<i>Advecció horitzontal d'O₂</i>	Molt poca	Important	Mínima (domina intercanvi vertical)
<i>Més aigua dolça causa:</i>			
<i>-sobre el gradient horitzontal de densitat</i>	Disminució del gradient		Augment del gradient
<i>- sobre el flux de fons cap a terra</i>	Disminució		Augment
<i>- advecció horitzontal d'O₂</i>	Disminució		Augment
<i>Hipòxia</i>	Les condicions més propenses (essent tot el demás igual)	Possible	Absent

¹ Els Fiords són un cas especial d'estuari (veure text).

La importància de l'oscil·lació mareal

D'entre les causes que determinen els patrons de circulació estuària arreu del món, en general, cal destacar les mareas d'entre totes les altres. De fet, la paraula "estuària" ve del llatí *aestus*, marea, pel que la importància de les mareas en els estuaris era reconeguda des de ben antic.

Encara que l'efecte de la marea sobre l'estuari depèn de la relació entre el volum d'aigua intercanviat amb la marea i el volum total de l'estuari considerat, s'acostuma a parlar de zones macromareals quan l'amplitud de les mareas és superior a quatre metres, de mesomareals quan es troba entre dos i quatre metres, i micromareals per sota de dos (Davies 1964)². Generalment, es considera que a estuaris de zones meso i macromareals el moviment de l'aigua és dominat per les mareas, mentre que a les micromareals ho és sobre tot per les onades.

L'estudi de la hidrodinàmica dels estuaris micromareals, de fet, té molt d'interès ja que en reduir-se l'efecte de la marea astronòmica com a causa principal de moviment de l'aigua, altres factors que restaven inicialment en segon terme hi passen a jugar un paper fonamental. Les mareas baromètriques en aquests casos, per exemple, introdueixen canvis en l'alçada de la columna d'aigua amb els pas dels fronts atmosfèrics que poden afectar significativament els fluxos d'intercanvi d'aigua entre l'estuari i mar obert. Es pot considerar que un augment d'un milibar (mbar) de pressió atmosfèrica significa una disminució de l'alçada de la columna d'aigua en un centímetre, amb el conseqüent desplaçament de masses d'aigua.

L'efecte del vent

El vent influeix a dos nivells fonamentalment: 1) genera ones que provoquen turbulència i, per tant, barreja vertical, i 2) causa un cert esforç sobre la superfície de l'aigua que genera corrents.

En actuar sobre zones amb una certa profunditat, el vent pot produir un corrent net de l'aigua de mar, si té prou distància de recorregut sobre la superfície i les característiques batimètriques i el perfil de densitat del cos d'aigua ho permeten. Es pot considerar com a primera aproximació (a manca d'estimes més precises) que es produirà un corrent marí equivalent al 3% de la velocitat del vent que bufi unes quantes hores seguides (com a mínim, més de l'invers del paràmetre de Coriolis f), i serà desviat de l'ordre de 15° cap a la dreta a l'Hemisferi Nord (Gill 1982). Com a referència, val a dir que vents per exemple de 3 m s^{-1} que bufessin durant més de tres hores seguides a mar obert en latituds temperades podrien provocar uns corrents marins de l'ordre de 9 cm s^{-1} , 15° cap a la dreta de la direcció del vent. En estuaris, amb major efecte de la fricció amb les vores i el fons, el corrent resultant seria inferior.

² Posteriorment, Hayes (1979) va modificar aquesta classificació de cara definir millor els mesomareals, però canviant també el líndar dels micromareals, de la següent forma: micromareal, < 1 m.; mesomareal baix, 1-2 m.; mesomareal alt, 2-3.5 m.; macromareal baix, 3.5-5 m.; macromareal, > 5 m. De totes formes, a molts textos científics hem continuat trobat la classificació inicial per Davies (1964), raó per la qual és aquesta la que hem emprat aquí.

Els aports d'aigua dolça

Les entrades d'aigua dolça provoquen circulació i barreja per gradient horitzontal de pressió creat per la diferència de densitat entre l'aigua dolça que entra i l'aigua salada existent (Officer 1983). Com l'aigua menys densa flueix per sobre l'aigua més densa cap a mar obert, la turbulència a l'aigua de la interfase causa que les dues capes es barregin parcialment i per tant que es redueixi la diferència de densitat entre ambdues (Rattray i Hansen 1962 , Hansen i Rattray 1965, més simplificat a Officer 1976).

Objectius del capítol

Vista la introducció general a l'hidrodinamisme en estuaris i badies estuarianes d'arreu del món, els objectius del present capítol són:

- presentar l'àrea d'estudi d'aquesta tesi doctoral,
- mostrar les seves característiques en quant al moviment de l'aigua es refereix, quantificant l'ordre de magnitud dels fluxos d'aigua a la badia a causa de les diferents forces implicades. Aquesta quantificació servirà posteriorment per analitzar el grau d'implicació dels fluxos d'aigua per regular la concentració d'oxigen dissolt a l'aigua de la badia.
- aclarir el paper del vent regulant les velocitats instantànies del corrent d'entrada d'aigua a la badia i el flux net diari, així com barrejant la columna d'aigua, per aclarir dubtes sobre la magnitud de l'efecte del vent per modificar el registre de velocitats mesurat pel correntímetre en un sistema somer com la badia dels Alfacs.

Descripció de l'àrea d'estudi

Característiques generals

La Badia dels Alfacs està situada al costat sud del Delta de l'Ebre, a la costa nord-est de la Península Ibèrica, banyada per les aigües del Mediterrani Occidental. Té una extensió de 50 km² (Figura 1.2a) amb una longitud d'uns 13 km d'Oest a Est, i uns 4 km de Nord a Sud. L'estructura batimètrica de la badia dels Alfacs (Figura 1.2a, Figura 1.3) mostra que existeix, tot vorejant la badia, una plataforma de fondària mitja de 0.64 metres, de pendent una mica més pronunciat al costat nord que al costat sud. Al mig, la badia arriba a 6.5 m de fondària màxima, essent la fondària mitja d'aquesta zona (a partir d'ara, anomenada "cubeta") de 4.17m (Taula 1.2), i quedant separada de mar obert per un "ressalt" de prop de 5.5m de fondària (Figura 1.5a). El nom "Alfac" prové del s. XVI; de l'àrab "*al-fakk*" ('mandíbula, gola'), que vol dir "banc de terra o de sorra que es forma al litoral a la desembocadura d'un riu" (Diccionari de l'Enciclopèdia de la Llengua Catalana), fent referència a la barra de sorra (Barra del Trabucador) que protegeix la badia de mar obert des de l'Est fins el Sud, on hi ha la península de la Banya (Figura 1.2b).

De fet, un "estuari" es pot definir típicament com un cos d'aigua en que l'aigua del riu es barreja amb i dilueix mesurablement l'aigua de mar (Ketchum 1983). Essent una mica estrictes amb els termes caldria aclarir, doncs, que l'estuari pròpiament dit del Delta de l'Ebre és el que segueix el curs fluvial principal del riu. Ara bé, com que la badia dels Alfacs rep aports d'aigua dolça dels canals dels arrossars per superfície i aports d'aigua salada directament de mar obert pel fons, doncs també presenta un funcionament estuarià. Podem parlar de funcionament d'estuari positiu (Pritchard 1952), ja que els aports d'aigua dolça són en general superiors a les pèrdues per evaporació, i això alhora condiciona un funcionament de "circulació clàssica" o de tipus 1, segons la classificació de 6 modes de circulació d'estuaris d'Elliot (Elliot 1976): l'aigua marina entra per la capa de fons i l'aigua

estuariana, barrejada amb l'aigua dolça continental, surt per la capa superficial de nou cap a mar obert.

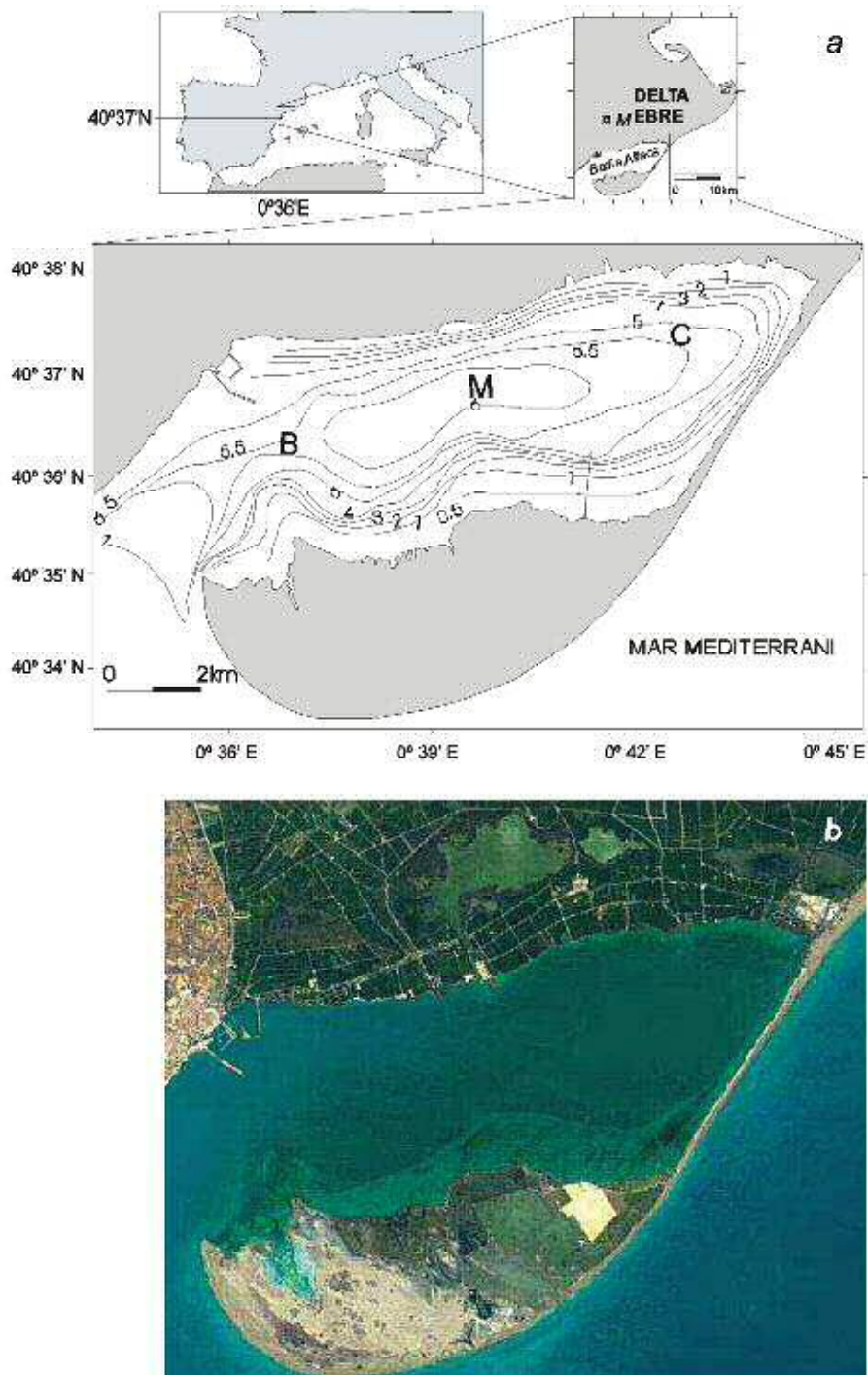
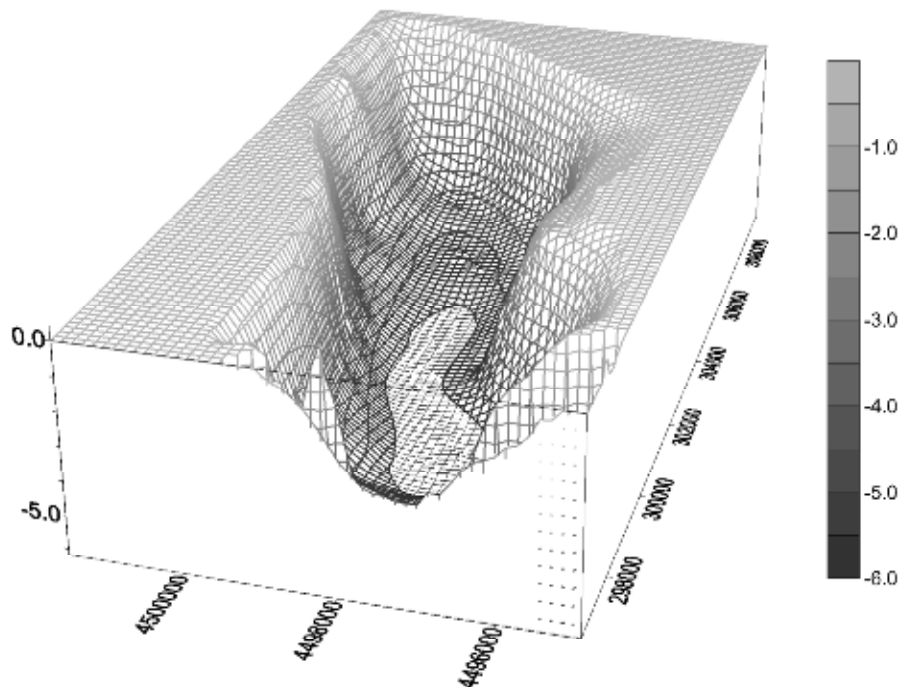


Figura 1.2 Badia dels Alfacs (Delta de l'Ebre): (a) localització geogràfica del lloc d'estudi amb detall del mapa batimètric, i de les estacions de mostreig "Boca", B, "Mig", M i "Cua", C; (b) imatge de satèl·lit on es poden apreciar les llacunes costaneres de l'Encanyissada (esquerra) i la Tancada (dreta), envoltades de camps d'arròs (parcel·les poligonals) i l'entramat de canals de rec i desguàs de la plana deltaica que vessen a la badia. L'anomenat de vegades "punt central" correspon a l'estació "Mig", M.

Taula 1.2 Característiques morfològiques de la Badia dels Alfacs.

Variables	Lloc	Valor
	Total	49
Superfícies (km ²)	Plataformes	18
	Nord	6
	Sud i Est	12
	Cubeta Central	31
Volums d'aigua (m ³)	Total Badia	153 x 10 ⁶
	Entrades d'aigua dolça anuals	275 x 10 ⁶
Fondàries (m)	Mitjana de la Badia	3.13
	Màxima de la Badia	6.5
	Mitjana plataformes	0.64
	Mitjana de la cubeta central	4.17

**Figura 1.3 Batimetria dels Alfacs en 3 dimensions.*****Oscil·lació mareal***

El Mediterrani Occidental no presenta marees significatives en general i les seves amplituds mareals diàries solen ser inferiors als 30 cm (Margalef 1985). Al delta de l'Ebre l'amplitud mareal diària ronda els 20 cm (Guillén 1992) i el prisma mareal (el volum d'aigua entrat i sortit de la badia per efecte de la marea respecte el volum total de la badia) és de l'ordre del 4 %. Per aquesta raó, es descarta la marea com a principal força generadora d'advecció (Camp 1994). Aquesta manca d'importància relativa de l'advecció mareal condicionarà el funcionament hidrodinàmic de la badia, deixant-lo més sensible, *a priori*, als altres factors com els aportes d'aigua dolça i el vent. Per aquesta raó, parlem de

badia estuariana micromareal o, de manera menys tècnica, com a una badia sense forçament mareal apreciable.

L'aigua dels canals

La plana deltaica està coberta majoritàriament per arrossars. El seu període de cultiu marca profundament la dinàmica de circulació d'aigua de les badies adjacents. Aquest període dura com a mitjana 180 dies entre abril - maig i setembre - octubre de cada any. La part nord de la badia dels Alfacs, doncs, rep entrades d'aigua dolça de l'ordre de $220 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ a}^{-1}$ (Camp 1994) provenint dels camps de cultiu. Aquestes entrades d'aigua dolça venen canalitzades per nombrosos desguassos dels arrossars i de les llacunes costaneres. Més recentment, s'ha afegit el desguàs de la depuradora d'aigües residuals de Sant Carles de la Ràpita, etc. (Figura 1.4). A partir de la configuració de la xarxa canals de rec i de desguàs existents (que no ha canviat notablement des de l'estudi de Hydrotechnic-Corporation 1966) se sap que aproximadament el 70% de l'aigua dolça que rep la Badia dels Alfacs de la plana deltaica arriba a través de tres canals: el canal de la Sèquia del Ala, el del Desguàs General (o de Campredó, segons la nomenclatura de la comunitat de regants), i el de comunicació amb la llacuna costanera de l'Encanyissada.

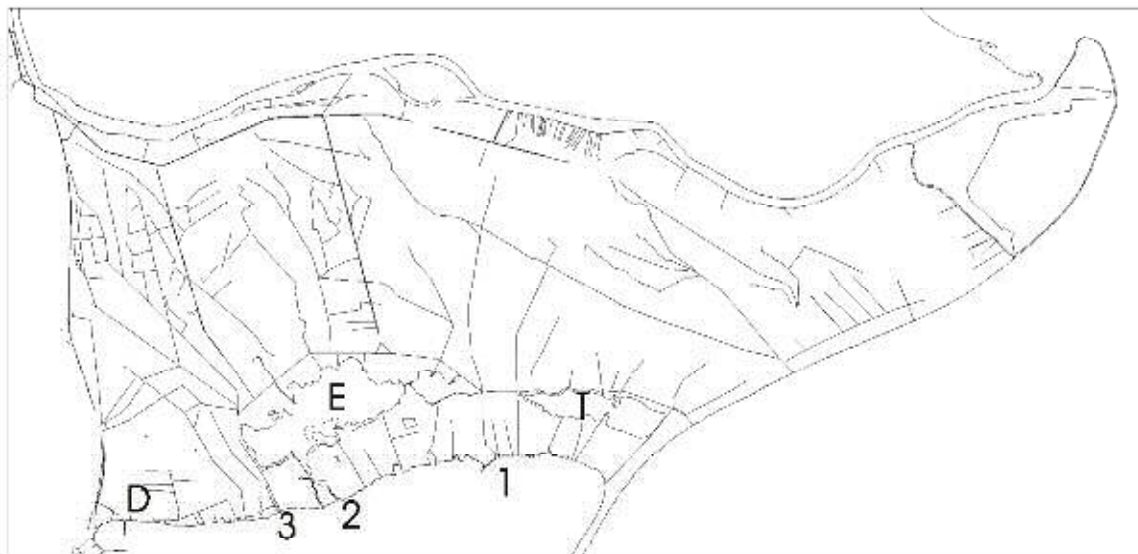


Figura 1.4 Principals canals d'entrada d'aigua dolça. (1. Canal de la Sèquia de l'Ala; 2. Canal de l'Encanyissada; 3. Canal del Desguàs General o de Campredó; E. Encanyissada; T. Tancada; D. Depuradora de Sant Carles de la Ràpita.

Els arrossars desguassen l'aigua amb que se'ls ha regat per gravetat sempre que la diferència de nivell ho permeti, anant a parar en últim terme al mar. Ara bé, en condicions de baixes pressions en que l'alçada del mar és important i pot dificultar o fins i tot invertir el flux de sortida d'aigua al mar a través dels canals de desguàs, es fan servir estacions de bombeig per a fer circular l'aigua de terra cap al mar. Cal considerar també que els treballs preparatoris del cultiu, en els que els canals de desguàs s'han de mantenir a nivell baix, i si s'acumula aigua de pluja o del freàtic que sigui interceptada pels canals, aquesta ha de ser bombada fora del canal. Totes aquestes raons fan que

els canals aboquin aigua generalment per gravetat de terra cap al mar durant el període de cultiu de l'arròs i que durant el període en què es mantinguin tancats aquests canals, l'única aigua dolça que pugui entrar a la badia sigui la precipitació neta directa, les possibles entrades freàtiques directes d'aigua dolça o l'aigua bombada fora dels canals per mantenir-los secs, que eventualment ha arribat per pluja en la conca receptora o per intercepció de l'aigua freàtica en la xarxa de canals del delta.

Així doncs podem considerar que d'Abril fins a Setembre els canals de rec dels arrossars es troben oberts, i de la mateixa manera es troben els canals de desguàs que vessen el seu contingut d'aigua dolça al mar. De tots aquests, cal destacar que només dos canals amb estació de bombeig vessen les seves aigües directament a la badia dels Alfacs: el canal de la Sèquia de l'Ala i el canal del Desguàs General (canal de Campredó), limitant per l'Est i per l'Oest respectivament la llacuna de l'Encanyissada (Figura 1.4). Molta de l'aigua amb que es reguen els arrossars es desguassa cap a la llacuna de l'Encanyissada, raó per la qual el canal de sortida de l'Encanyissada és un altre font d'aigua dolça per a la badia.

En terme mig es poden assignar uns fluxos d'aigua dolça teòrics cap a la badia per cadascuna de les dues situacions tipus, és a dir, *canals tancats* i *canals oberts* (Taula 1.3). En general, s'aboca per la zona nord de la badia una quantitat que equivaldria a de l'ordre de $1.16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per cadascun dels tres terços de la ribera nord de la badia (els quals anomenarem a partir d'ara pel nom del canal més important que tenen a dins), en l'època de *canals tancats* (Camp 1994), i en l'època de *canals oberts*, per la zona dels canals de la Sèquia de l'Ala i el del Desguàs General s'aboquen $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mentre que per la zona de l'Encanyissada s'hi aboca $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Canicio i Ibáñez 1996). L'única estima sobre entrada d'aigua freàtica xifra el seu ordre de magnitud en $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a través de tota la vora nord de la badia (Camp i Delgado 1987), malgrat la seva quantificació amb exactitud resta pendent com a treball per al futur atesa la seva potencial importància com a font d'aigua dolça, especialment en l'època en que els canals de desguàs es troben tancats. A més, els valors previs d'aigua entrada pels canals ja tenen en consideració l'aigua freàtica que arribi a superfície, i que es veu interceptada i recollida per la xarxa de canals de rec i desguàs dels arrossars.

Taula 1.3 Fluxos d'aigua estimats per a cada zona, en canals oberts i canals tancats, en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$. C. Ala: Canal de la Sèquia de l'Ala. C. Enc: Canal de l'Encanyissada. C. Dgl: Canal del Desguàs General o Campredó. C.Dep.: Canal de la Depuradora de Sant Carles de la Ràpita. Dades de fluxos dels arrossars amb *canals oberts*: Canicio i Ibáñez (1996); i amb *canals tancats*: Camp (1994). Cal remarcar que no són sempre fluxes reals a través d'aquests canals, que de vegades són fins i tot secs, sinó entrades per cada terç arbitrari de ribera nord de la badia, a la qual s'ha anomenat amb el nom del canal més important que hi té a dins.

Període	Zona 1	Zona 2	Zona 3
	C. Ala	C. Enc.	C. Dgl.
Canals oberts (maig-novembre)	4	2	4
Canals tancats (desembre-abril)	1.16	1.16	1.16

Metodologia

Model de caixes

Per estimar l'ordre de magnitud dels fluxos d'aigua causats per diferències de salinitat, s'ha emprat el model de caixes en estat estacionari, que és l'aproximació més estesa en treballs similars (Munekage i Kimura 1985, Suzuki i Matsukawa 1987, Matsukawa i Sasaki 1990, Babenerd 1991, Fransz *et al.* 1991, Kimmerer *et al.* 1993, Kester *et al.* 1996, Norro i Frankignoulle 1996, Flindt i Kamp-Nielsen 1997, Katsuyuki i Satoru 1997, Justic *et al.* 1997, Hagy *et al.* 2000).

Es van considerar dues fondàries i tres punts al llarg de l'eix longitudinal Oest-Est, és a dir, sis compartiments en total, homogenis lateralment (Figura 1.2a, Figura 1.5a). Cada un dels compartiments superficials rep aigua dolça d'un dels tres canals principals i s'intercanvia aigua amb el mar obert (amb dos compartiments addicionals, exteriors a la badia) segons un funcionament d'estuari positiu. Hem anomenat les parts *exterior*, *boca*, *mig*, *cua*, segons l'eix Oest-Est, i *Sup* (de superficial) i *Fons*, segons la fondària i separades per la picnoclina, amb el que la nomenclatura emprada al llarg de la tesi pels compartiments queda com: *exteriorFons* (*exF*), *bocaFons* (*boF*), *migFons* (*miF*), *cuaFons* (*cuF*), *cuaSup* (*cuS*), *migSup* (*miS*), *bocaSup* (*boS*) i *exteriorSup* (*exS*), seguint el flux teòric de l'aigua marina en el seu recorregut principal al llarg de la badia.

Per que l'aplicació del model de caixes emprat doni resultats vàlids és necessari que el sistema es trobi en estat estacionari. Diem que la badia (o en general, una massa d'aigua parcialment confinada qualsevol) es troba en estat estacionari si es mantenen constants, pel període de temps considerat, el seu volum d'aigua i la seva massa de sal. Aquestes condicions, de fet, només es compleixen en comptades ocasions, com es veurà a partir dels resultats mostrats en capítols posteriors, atès que la salinitat mitjana de la badia i les dels compartiments *Boca*, *Mig* i *Cua* varien significativament mes a mes, i que hi ha canvis importants en la pressió atmosfèrica com per a què les diferències de pressió al llarg del pas d'un front atmosfèric duguin a canvis temporals de volum d'aigua significatius. Els valors obtinguts serveixen només per acotar l'ordre de magnitud dels fluxos i mentre duren aquestes condicions esmentades, amb el que aquest mètode de model de caixes en estat estacionari resulta limitat per a l'estudi que aquí es porta a terme.

Entre els compartiments definits s'estableixen una sèrie de fluxos, que es divideixen en fluxos advectionals i fluxos d'intercanvi, traducció literal dels termes anglesos emprats habitualment (Officer 1980). Els fluxos advectionals són aquells que comporten transport net d'aigua entre dos compartiments, sigui horitzontal (el més freqüent) o vertical (menys freqüent o de menor magnitud en estuaris, generalment, per la presència de picnoclina). Els fluxos d'intercanvi, que

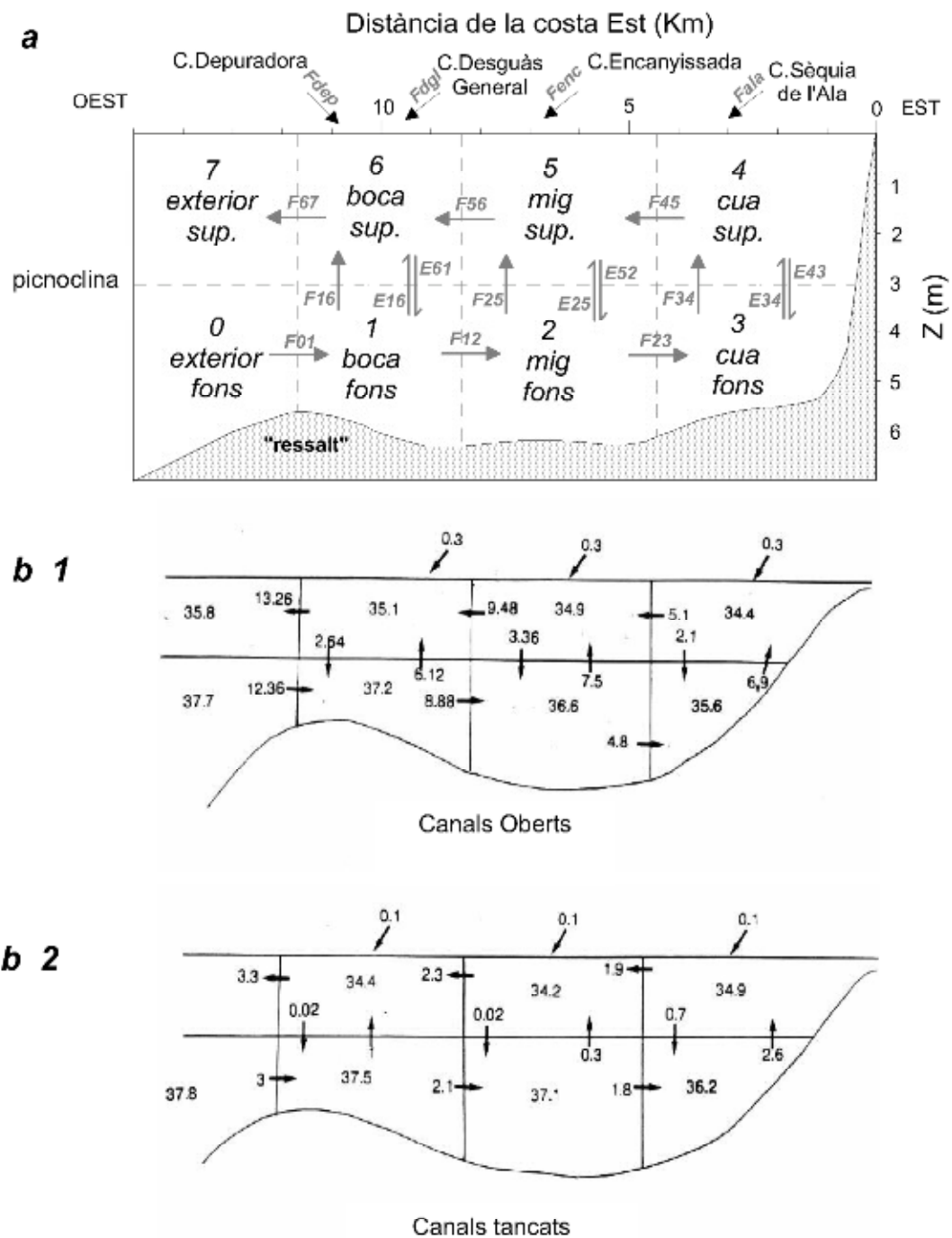


Figura 1.5 Model de caixes aplicat a la Badia dels Alfacs: (a) compartiments en que es divideix la badia, i noms dels fluxos entre compartiments, segons model de caixes de Officer (1980), i (b) fluxos mitjans durant (b1) *canals oberts* (maig-novembre) i (b2) *canals tancats* (desembre-abril). S'assumeix estat estacionari i salinitat i fluxos d'aigua dolça mitjans de cada període de càlcul de fluxos advectionals i d'intercanvi (de Camp, 1994). Unitats: fluxos d'aigua, $\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (fletxes) i salinitat, en psu (valor enmig dels compartiments).

també anomenem aquí com a "no-advectius", són termes de difusió turbulenta entre les masses d'aigua en contacte, que no comporten un moviment net d'aigua, però sí un transport d'aquells soluts pels que les concentracions als compartiments en contacte siguin diferents. Aquests fluxos d'intercanvi es donen fonamentalment en direcció vertical i per tant són aquests els únics considerats generalment en els models de caixes, malgrat ja comencin a aparèixer a la literatura treballs que incorporen en els seus models de caixes també el component horitzontal d'aquest flux d'intercanvi (Hagy *et al.* 2000).

Els compartiments estan numerats de 0 a 7, seguint el flux advectiu idealitzat de l'aigua marina. El número 0 correspon al compartiment *exterior fons*, l'1 a *boca fons*, el 2 a *mig fons*, 3 *cua fons*, 4 *cua superficial*, 5 *mig superficial*, 6 *boca superficial* i 7 *exterior superficial*. Els números 8 9 i 10 corresponen als canals de desguàs de la Sèquia de l'Ala (*S.Ala*), de l'Encanyissada (*Enc*) i del Desguàs General (*Dgl*), respectivament (Figura 1.5a).

Els fluxos advectius estan representats per la lletra **F** amb els subíndexos que corresponen al compartiment d'origen del flux i al compartiment destí del flux, en aquest ordre. Els fluxos d'intercanvi ("no advectius") estan representats per una **E** seguida també dels números dels dos compartiments entre els que s'intercanvia l'aigua. Així, per exemple, el flux d'entrada d'aigua marina a la Badia per *Boca fons* és el *F01*, és a dir, entre *Exterior fons* (0) i *Boca fons* (1), i el flux d'intercanvi entre *Mig fons* (2) i *Mig sup* (5) és representat per *E25* i *E52* (amb el valor absolut equivalent però el primer de pujada, i el segon, de baixada). Els fluxos dels canals s'han anomenat indistintament *F84* ó *Fala* per al canal de la Sèquia de l'Ala, *F95* ó *Fenc* per a la sortida de l'Encanyissada, i *F10_6* ó *Fdgl* per al canal del Desguàs General.

Les equacions per resoldre els fluxos per cada parell vertical de compartiments són 7, inicialment (Officer 1980). Explicarem per exemple les equacions en qüestió per a la parella de compartiments *mig fons* (2) i *mig sup* (5) (veure Figura 1.5)

Les primeres 2 equacions són conseqüència de la conservació de la sal (S) pel costat Est i Oest del parell de compartiments en consideració.

$$F_{45}S_4 = F_{23}S_2 \quad <1.1>$$

És a dir, la quantitat de sal que entra a *mig sup* per l'Est és igual a la quantitat de sal que surt de *mig fons* pel mateix costat Est.

$$F_{56}S_5 = F_{12}S_1 \quad <1.2>$$

El mateix que abans però ara pel costat Oest: la sal que surt a través de la piconclina cap al compartiment superficial equival a la que entra per l'oest al compartiment fons, a l'estació *mig*.

Les 3 següents són conseqüència de la conservació del volum d'aigua, essent *R* el volum d'aigua que entra pel costat Oest del parell de compartiments, que ha de ser igual al que surt pel costat Est del mateix parell:

$$F_{23} - F_{45} = R \quad <1.3>$$

$$F_{12} + F_{enc} - F_{56} = R \quad <1.4>$$

I la següent d'aquest subconjunt d'equacions fa referència al conjunt de volums d'aigua del compartiment superficial del parell:

$$F_{45} - F_{25} - F_{enc} = F_{56} \quad <1.5>$$

Les últimes dues integren les quantitats de sal entrades i sortides pel compartiment superficial a través de tots els costats possibles (Est, Oest i Verticalment en fondària).

$$F_{45} S_4 + S_2 (F_{25} + E_{25}) = S_5 (F_{56} + E_{52}) \quad <1.6>$$

sabent que

$$E_{25} = -E_{52} \quad <1.7>$$

Per aquest compartiment doble (per exemple, Boca superficial i Boca fons) tenim un sistema de 8 incògnites i 7 equacions. Formulant un sistema d'equacions de forma similar per cada un dels altres dos compartiments dobles (més senzill a Cua per ser compartiment extrem de la badia), obtenim un sistema d'equacions del que hem seleccionat les següents 12 (d'eq. <1.8> a eq. <1.19>):

$$F_{45} = \frac{F_{34} S_2}{S_2 - S_4} \quad <1.8>$$

$$F_{23} = \frac{F_{45} S_4}{S_2} \quad <1.9>$$

$$F_{34} = F_{23} \quad <1.10>$$

$$E_{34} = \frac{F_{45} S_4 - F_{34} S_3}{S_3 - S_4} \quad <1.11>$$

$$F_{12} = \frac{(-F_{45} + F_{23} - F_{enc}) S_5}{S_3 - S_1} \quad <1.12>$$

$$F_{56} = \frac{F_{12} S_1}{S_5} \quad <1.13>$$

$$F_{25} = F_{56} - F_{enc} - F_{45} \quad <1.14>$$

$$E_{25} = \frac{F_{56} S_5 - F_{45} S_4 - F_{25} S_2}{S_2 - S_5} \quad <1.15>$$

$$F_{67} = \frac{(F_{56} - F_{12} + F_{ogl}) S_0}{S_0 - S_5} \quad <1.16>$$

$$F_{01} = \frac{F_{67} S_5}{S_0} \quad <1.17>$$

$$F_{16} = F_{67} - F_{56} - F_{ogl} \quad <1.18>$$

$$E_{16} = \frac{F_{67} S_5 - F_{16} S_1 + F_{56} S_5}{S_1 - S_6} \quad <1.19>$$

Aquestes 12 expressions ja resolen analíticament els fluxos que compleixen la condició d'estat estacionari. Val la pena remarcar, un cop més, que aquests fluxos no avaluen amb precisió el flux real, sinó que representen una aproximació a un flux compatible amb la persistència de la distribució observada de salinitats i volums d'aigua, amb el que els valors obtinguts serveixen com a ordre de magnitud per a tot el període de canals de desguàs dels arrossars oberts i per a tot el període en que es troben tancats. Aquests mateixos valors es faran servir en altres capítols per al càlcul de balanços d'oxigen estacionalment al llarg de l'any.

Entrades d'aigua dolça

Les entrades netes d'aigua dolça corresponen a l'aigua abocada pels canals juntament amb l'aigua de pluja menys l'aigua evaporada. L'aigua que entra pels tres canals considerats (o zones arbitràriament definides que comprenen aquests canals) és de l'ordre de 10 i $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en total per a l'època en que els canals es troben oberts i tancats, respectivament (Taula 1.3), si bé mancaria tenir en compte que, en teoria, l'aigua entrada pels tres canals considerats representa tan sols el 70% de les entrades per tots els canals de desguàs, segons s'extreu de la informació de l'estructura de la xarxa de canals i les seves mides relatives. Mancaria també afegir la precipitació directa, tot i que aquesta ha estat menyspreable, en general, en comparació amb les entrades pels canals (que, a més, ja recullen la precipitació indirecta que acaba arribant a la badia a través dels canals). Mancaria també extreure l'evaporació de la badia, malgrat les incerteses que existeixen associades amb el càlcul de l'evaporació (veure apartat de dades meteorològiques). El resultat final d'aplicar aquestes correccions no és gaire diferent dels valors inicials considerats (entre 12.6 i $11.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respecte els $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ inicials, per a canals oberts, i entre 2.9 i $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ respecte els $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ inicials per a canals tancats), i per aquesta raó són els valors inicials els que s'han pres com a entrades netes d'aigua dolça de cara al model de caixes en estat estacionari, que per altra banda són molt similars als ja emprats en estudis anteriors per a la badia dels Alfacs (10.4 i $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en conjunt per a l'època amb canals oberts i tancats, respectivament; Figura 1.5b1, b2). Per tant, no s'ha considerat necessari aplicar cap correcció a aquests valors de cara a emprar-los, en el marc d'aquesta tesi, com a les entrades netes d'aigua dolça a la badia que provocaven corrents hidrodinàmics per diferències de densitat

Mesures directes de fluxos i altres registres

Es van obtenir dades de direcció i velocitat del corrent utilitzant un sensor oceanogràfic de corrents marca AANDERAA, model RCM7. Va ser ancorat a 5.6 m de fondària, a sobre del ressalt de la zona de connexió amb mar obert (Figura 1.5a), de manera que el rotor i els sensors estaven situats a uns 4.5 m de fondària.

L'aparell va enregistrar dades internament cada 10 minuts en seqüències de 12 segons durant els períodes entre el 12 setembre i 8 octubre de 1997 , entre el 9 octubre i el 12 novembre de 1997 , entre el 17 i el 22 de setembre de 1998 , entre el 15 i el 20 d'octubre de 1998 , i entre el 11 novembre i el 9 desembre 1998 . Les dades van ser enregistrades en una unitat d'emmagatzematge extraïble, amb

una resolució i precisió conegudes de les variables mesurades (Taula 1.4). Els registres van ser pre-processats per identificar errades en l'adquisició de dades.

Taula 1.4 Especificacions de les variables mesurades pel correntímetre AANDERAA RCM7.

	Direcció del corrent ()	Velocitat del corrent (cm s ⁻¹)
Rang	0 - 360	2-250
Resolució	0.35	±1
Precisió	±7.5	2

Les dades d'alçada de la columna d'aigua provenen d'un altre aparell col·locat a la part central de la badia ("punt central", Figura 1.2a). Aquest sensor de fondària es trobava a 40 cm del fons de la badia en una sonda multiparamètrica model Ysi 6000, (veure Capítol 3) enregistrant cada 10 minuts durant tres períodes: entre el 16 i 22 de setembre de 1997, entre el 17 de setembre i el 15 d'octubre de 1998, i entre el 12 de novembre i el 9 de desembre de 1998. Els registres van ser pre-processats per identificar errades en l'adquisició de dades. Les dates expressades en forma de dies julians són comptades des de l'1 de gener de cada any en qüestió.

Origen de les dades meteorològiques

Es va recopilar el registre de dades de velocitat i direcció del vent, radiació solar, precipitació i evapotranspiració de referència de l'estació meteorològica d'Amposta, abans del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya (anomenada a partir d'ara Amposta-DARP). En trobar-se mancada l'estació de registre de dades de pressió atmosfèrica, aquesta variable va ser obtinguda de l'estació meteorològica del Departament de Medi Ambient de la Generalitat de Catalunya a la mateixa localitat d'Amposta (Amposta-DMA, a partir d'ara). La primera estació enregistra dades cada 60 minuts i la segona cada 30. Ambdues són ara propietat del Servei de Meteorologia de Catalunya (SMC) però al llarg de la tesi doctoral mantenim els noms antics per identificar fàcilment la procedència de les dades, atès que ambdós registres de la variable clau de la velocitat del vent difereixen significativament entre elles, essent Amposta-DARP la més semblant a les nostres apreciacions de velocitat del vent *in situ* a la badia dels Alfacs. Aquestes dades van ser pre-processades per eliminar les corresponents a possibles errors de lectura.

Evaporació, evapotranspiració i precipitació neta

L'evaporació no sol mesurar-se directament a les estacions meteorològiques. Es poden fer mesures directes amb aparells específics com evaporímetres o tancs d'evaporació, o bé fer-ne estimes indirectes a partir d'altres variables. L'ús d'evaporímetres no dóna estimes prou fiables d'evaporació (Jansà i Guardiola 1985 i Sánchez-Rodríguez 1990). Els tancs d'evaporació poden ser de dos tipus fonamentalment (Allen *et al.* 1998): de "Classe A" (similar a un tanc cilíndric de 120 cm de diàmetre i 25cm de profunditat, sobre un palet de fusta) i del tipus "Colorado Sunken" (tanc cúbic de dimensions 1 x 1 x 0.46 m i soterrat). El tanc que dóna estimes més similars a les d'una badia seria el segon

model (atès que el primer permet que hi hagi circulació d'aire per sota del cilindre), però no n'hi ha cap d'instal·lat a Catalunya. Del model de "Classe A" si que n'hi ha d'instal·lats, però cap d'ells a prop del delta de l'Ebre (Gázquez 2002). Les dades d'evaporació són doncs, en general, escasses.

Així, López-Jurado (1983) dóna valors per a alguns punts de la costa del mar balear a partir d'una sèrie de 30 anys. Aquestes estimes van ser obtingudes combinant diverses dades ambientals preses des de vaixell i des de terra. Els seus resultats no segueixen un patró estacional com seria esperable, atès que, segons els seus càlculs, l'evaporació no varia pràcticament durant uns quants mesos seguits (per exemple, 2.2-2.4 mm d⁻¹ de març a juny, ó 3.3-3.8 de juliol a setembre). A més, i com a referència per comparació amb valors posteriors d'aquesta tesi, les evaporacions mitjanes a la costa a l'alçada de Tortosa (la dada més propera al Delta de l'Ebre) són de 3.0 i 3.6 mm d⁻¹ per als mesos en que els canals són oberts i tancats, respectivament, que si s'apliquen als 50 Km² de badia equivalen a 1.7 i 2.1 m³ s⁻¹, respectivament.

Per altra banda es disposa de les dades d'"evapotranspiració de referència" ("ET₀", antigament anomenada també com a "evapotranspiració potencial") de les estacions meteorològiques automàtiques del SMC, instal·lades al llarg de la costa catalana. L'ET₀ es pot calcular a través de moltes fórmules diferents, però la més acceptada i proposada com a estàndard és l'equació de la "FAO Penman-Monteih" (Allen *et al.* 1998), que és, a més, l'emprada pel Servei de Meteorologia de Catalunya. Aquesta fórmula prové d'aplicar uns factors de resistència a l'evaporació (a causa de la vegetació) a la fórmula de Penman (1948), en què es calculava l'evaporació d'una superfície oberta d'aigua a partir de registres de radiació solar, temperatura, humitat i velocitat del vent. L'ET₀ calculada pel mètode "FAO Penman-Monteih" sembla molt similar a les mesures dels tancs d'evaporació de tipus "Colorado Sunken" (només un 3% inferior en condicions similars a les d'Alfacs de "fetch" - 1 km - , humitat relativa mitjana - 70% - i velocitat mitjana del vent - 2 m s⁻¹ - , a partir de les dades mostrades a Allen *et al.* (1998). Per aquesta raó, i encara que no té cap sentit parlar d'evapotranspiració a la badia dels Alfacs, creiem que les dades d'ET₀ són la millor aproximació de la que disposem per estimar les pèrdues d'aigua per evaporació a la badia.

L'ET₀ estimada pel Servei de Meteorologia de Catalunya segueix el cicle estacional de radiació solar i temperatura (veure exemple a la Figura 2.2, plana 77) amb mitjanes per Amposta de 4.2 i 1.8 mm d⁻¹ per l'època de canals oberts i canals tancats, respectivament, que equivalen a la seva vegada a 2.4 i 1.0 m³ s⁻¹, un cop aplicades a la superfície de tota la badia.

Es va calcular la precipitació neta com la diferència entre la precipitació total i l' ET₀.

Tractament de les dades

El càlcul de l'oscil·lació mareal es va realitzar a partir del registre de fondària de la sonda multiparamètrica com a la diferència entre el màxim i el mínim de fondària (i per tant, d'alçada de la columna d'aigua) enregistrada en un cicle de 12 hores, corregit per la pressió atmosfèrica de l'estació meteorològica per tal de separar la marea baromètrica de l'astronòmica. Aquesta correcció es va

realitzar assumint que cada mil·libar de pressió atmosfèrica per sobre dels 1013 mbar de condicions normals suposa una disminució d'1 cm de l'alçada de la columna d'aigua (Svendsen, H., *com. pers.*). Es va calcular també el flux d'aigua ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$) necessari per fer possible la diferència d'alçada de la columna d'aigua mesurada per la sonda, a través de multiplicar la superfície total de la badia ($44 \times 10^6 \text{ m}^2$) per la diferència entre l'alçada màxima en metres de la columna d'aigua d'un dia i la del dia següent.

El vector de velocitat enregistrat pel correntímetre va ser descompost en els components N-S (v) i E-O (u). Com la orientació predominant dels corrents va ser paral·lela o perpendicular a la direcció de l'eix principal de la badia (70-250°), els components ortogonals del vector de velocitat es van rotar 70° en sentit horari, i els nous eixos de referència van ser reanomenats com v' (en direcció a l'eix principal de la badia) i u' (en direcció transversal a l'anterior), d'acord amb la direcció principal observada en el conjunt de dades del registre. Es prenen com valors positius els que són en direcció estuari endins i cap al sud, respectivament.

Es va realitzar una anàlisi espectral de les sèries a partir de la transformada de Fourier Ràpida, extraient la mitjana i la tendència de cada sèrie (StatSoft 1999). Per estudiar la relació entre variables a partir de les seves sèries temporals es va aplicar una anàlisi de les correlacions simples i creuades per les dues sèries senceres per un costat, i per l'altre es va fer servir la tècnica de la Correlació Dependent d'Escala (SDC, Rodó 2001, Rodó i Rodríguez-Arias 2002). Aquesta tècnica fonamentalment calcula la correlació entre totes les parelles possibles de trossos d'extensió determinada ("escala") de dues sèries temporals. Després de seleccionar només les correlacions significatives determinades mitjançant un mètode no paramètric (test d'aleatorització) se'n fa una representació gràfica en dos dimensions. A partir dels patrons observats en aquest gràfic se'n pot inferir el tipus d'interacció entre totes dues sèries. Les zones amb correlació positiva són mostrades per acumulació de punts negres en el gràfic, i les zones amb correlació negativa, per acumulació de punts vermells. La manca de punts negres o vermells indica que les dues sèries no estan correlacionades en aquella zona. La diagonal principal és la línia on es troben els valors de correlació sense decalatge entre les sèries. D'aquesta manera es pot observar fàcilment en quins moments es produeixen altes correlacions entre les dues variables analitzades (acoblament de les dues sèries) i en quins moments al llarg del temps aquesta correlació es perd. Aquesta tècnica ha estat descrita com a capaç d'extreure, com a mínim, la mateixa informació, o fins i tot més, que la que es pot extreure amb altres tècniques per anàlisi de sèries temporals, com el *Wavelet Analysis* (Percival i Walden 2000), amb la gran diferència que la manipulació és molt més senzilla en el cas de l'SDC (Rodríguez-Arias i Rodó 2002). La tècnica de l'SDC ja s'ha fet servir en treballs en certa manera similar, en el camp de la climatologia estudiant la interacció entre la temperatura superficial de l'aigua de mar i la circulació atmosfèrica a gran escala (Rodó 2001).

Val la pena puntualitzar que els vectors de velocitat del vent fan referència a d'on ve el vent, i que els vectors de velocitat del corrent per la seva banda i a diferència dels de vent, indiquen cap a on va el

corrent. Aquesta consideració s'ha de tenir present a l'hora d'interpretar correctament el signe de les correlacions entre les sèries de velocitat de corrent i de vent, especialment.

Per últim, per obtenir el flux net residual diari al llarg de l'eix principal de l'estuari es va calcular primer la velocitat mitjana diària i es va considerar que el flux és igual a aquesta velocitat per una superfície de 1000 m d'ample i 3.5 m d'alçada de la capa fonda fins arribar a la pycnoclina, per seguir la mateixa aproximació prèvia emprada a la badia (Camp 1994). L'anàlisi de la seva correlació amb variables atmosfèriques es va realitzar agrupant totes les dades disponibles dels diferents períodes de lectura del correntímetre. S'aborda en el capítol, a més, el possible efecte del vent sobre la hidrodinàmica de la badia a escala de temps de les poques hores.

Resultats

Fluxos d'aigua entre compartiments

El resultat de l'aproximació mitjançant el model de caixes en estat estacionari per a la distribució de salinitats mitjana durant la situació de *canals oberts* indica que existeix un flux de l'ordre de $12.4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ d'aigua salada d'entrada a la badia (Figura 1.5b), amb entrades d'aigua dolça de $0.9 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ i un flux de sortida per l'estació boca superficial cap a mar obert de $13.3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. En situació de *canals tancats* (Figura 1.5c), les entrades d'aigua dolça no superen els $0.3 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, i el flux d'entrada és de $3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ per *boca fons* i el de sortida de $3.3 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ per *boca sup*, amb uns fluxos d'intercanvi verticals entre 3 i 20 vegades inferiors respecte la situació de *canals oberts*. S'observa, a més, que el flux de barreja vertical és més elevat en la situació de canals oberts que en la situació de canals tancats.

Si apliquem un model de caixes a les situacions concretes de les campanyes de mostreig, el flux estimat per aquest mètode d'entrada a la badia per la capa d'aigua inferior es troba al voltant dels $25 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ en campanyes de mostreig de l'època de canals oberts i de $5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ durant l'època de canals tancats (Figura 1.6). La situació més extrema de flux residual, segons aquest mètode, és la corresponent a l'1 d'octubre de 1997, en que el flux estimat va ser de l'ordre de $100 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Aquests valors il·lustren què passa quan s'aplica el model de caixes amb condicions lluny de l'estat estacionari, tal i com es comentarà a la discussió.

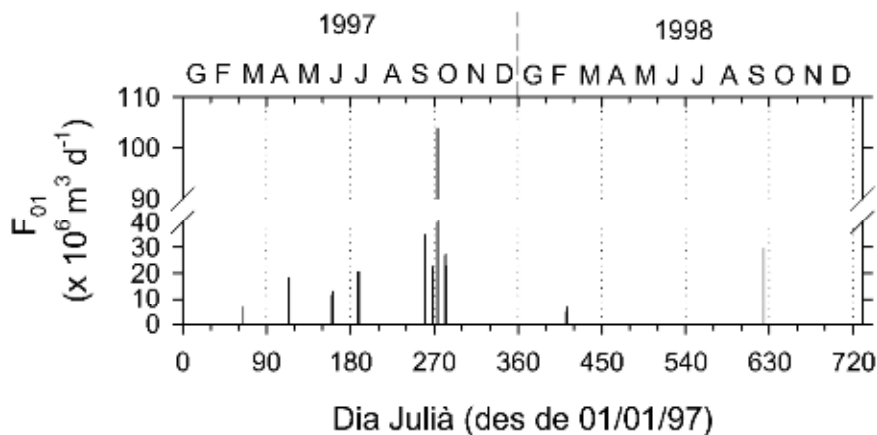


Figura 1.6 Fluxos d'entrada a la badia per sobre del ressalt (F_{01}), estimats pel mètode del model de caixes en estat estacionari (Officer 1980). Veure text per més detalls.

Oscil·lació mareal

L'oscil·lació màxima de l'alçada de la columna d'aigua al punt central de la badia dels Alfacs és inferior a 20 cm durant el període de 5 dies de setembre de 1997, a partir de dades cada 10 minuts, inferior a 29 cm als períodes entre setembre i octubre, i novembre i desembre de 1998 (Figura 1.7 a, b, i c).

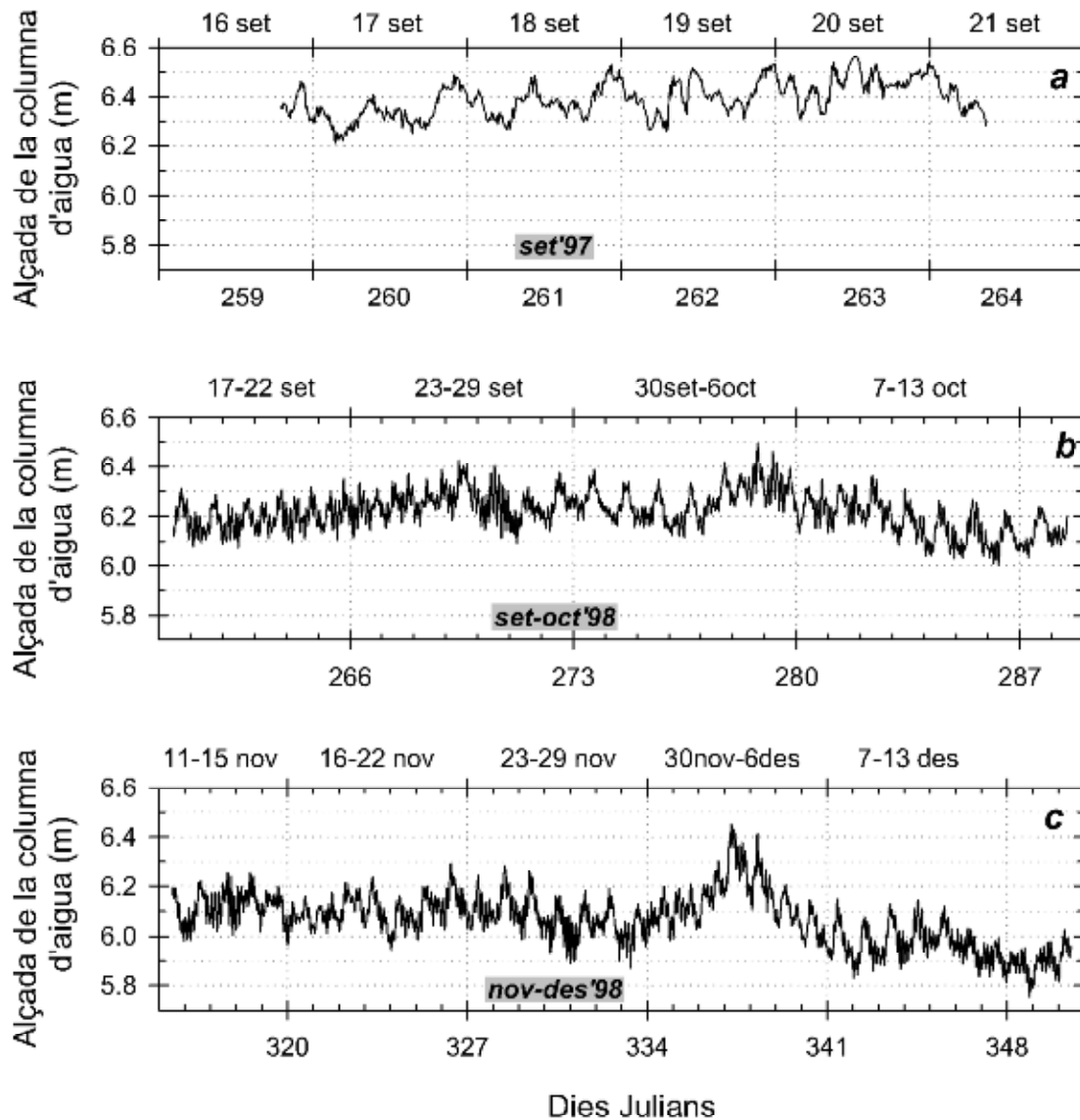


Figura 1.7 Oscil·lació de l'alçada de la columna d'aigua a la badia dels Alfacs: (a) setembre de 1997 (5 dies), (b) setembre-octubre de 1998 (29 dies), (c) novembre-desembre de 1998 (36 dies). Dades de sonda multiparamètrica instal·lada en estació mig fons a 40cm sobre el sediment, corregides per a la pressió atmosfèrica (en el 0 es mostren les dades del gràfic (a) sense corregir). Els valors dels dies julians de (b) i (c) marquen l'inici del dia en qüestió.

El cabal d'aigua desplaçat per fer possible la diferència d'alçada de la columna d'aigua entre dies successius es troba entre els -4×10^6 i els $+4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ generalment, amb abundants canvis de signe cada pocs dies i uns valors extrems de 6.6×10^6 i $-9.2 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ (Figura 1.8a, b, c). Les diferències d'alçada observades es troben entre els -10 i $+10 \text{ cm d}^{-1}$, essent els valors extrems de -21 i $+15 \text{ cm d}^{-1}$, ambdós enregistrats la setmana de l'1 al 7 de desembre de 1998.

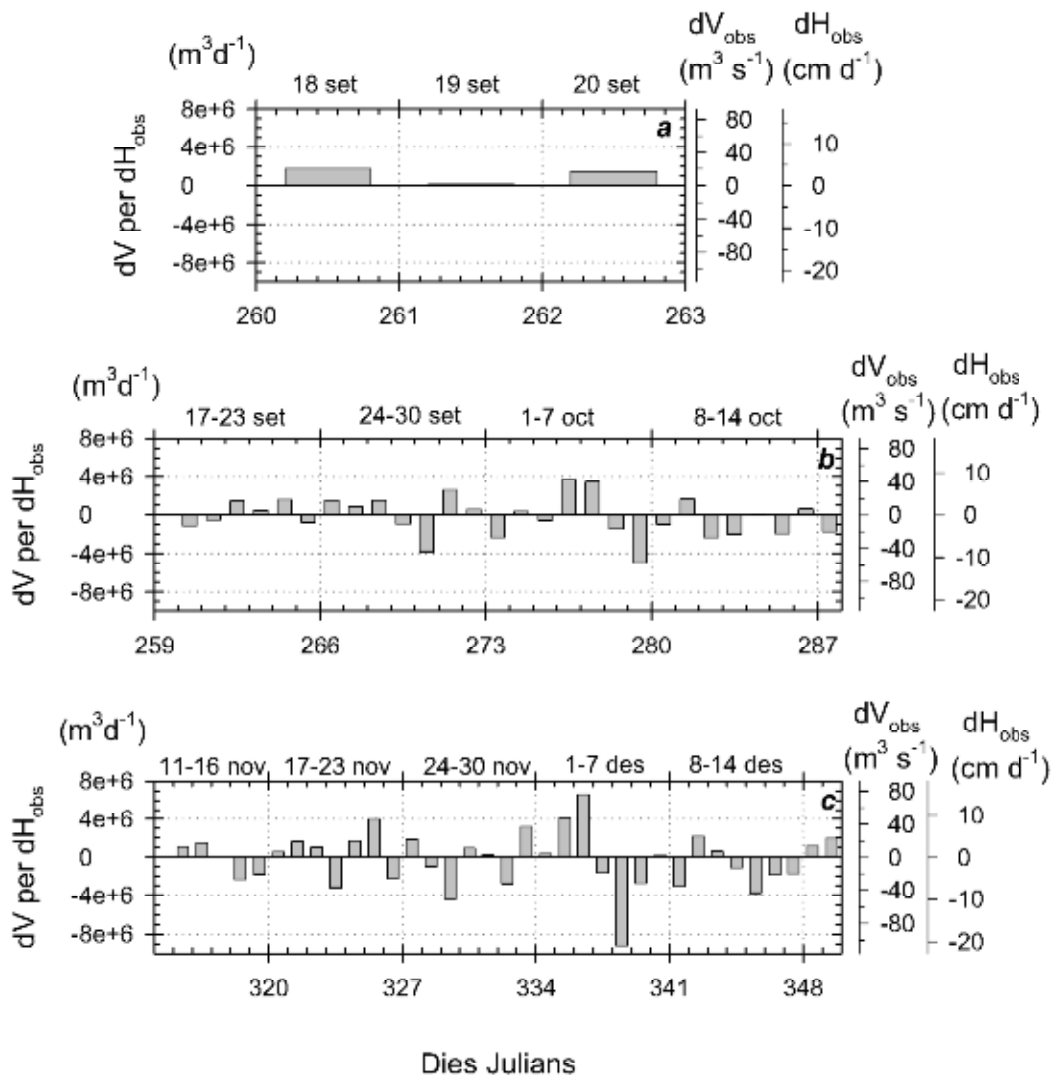


Figura 1.8 Cabal d'aigua diari total entrat (+) o sortit (-) de la badia dels Alfacs per tal de complir les diferències d'alçada de la columna d'aigua entre dies consecutius enregistrades in situ: (a) setembre de 1997 (3 d), (b) setembre-octubre de 1998 (28 dies), (c) novembre - desembre de 1998 (33 dies). Els valors dels dies julians marquen l'inici del dia en qüestió.

Corrents d'aigua

Les dades brutes expressades com a vectors de velocitat dels registres del correntímetre són difícils de visualitzar en mitjanes horàries, com es pot observar en l'exemple del registre del 12 de setembre a 8 d'octubre de 1997 (Figura 1.9a). La mitjana horària de la intensitat del vector de velocitat mostra que oscil·la entre zero i 20 cm s^{-1} (Figura 1.9b), i en descompondre el vector de velocitat en les seves components ortogonals segons els eixos de referència N-S (component V) i E-W (component U) s'observa que el component Nord-Sud és el que predomina amb les majors velocitats (Figura 1.9c, d).

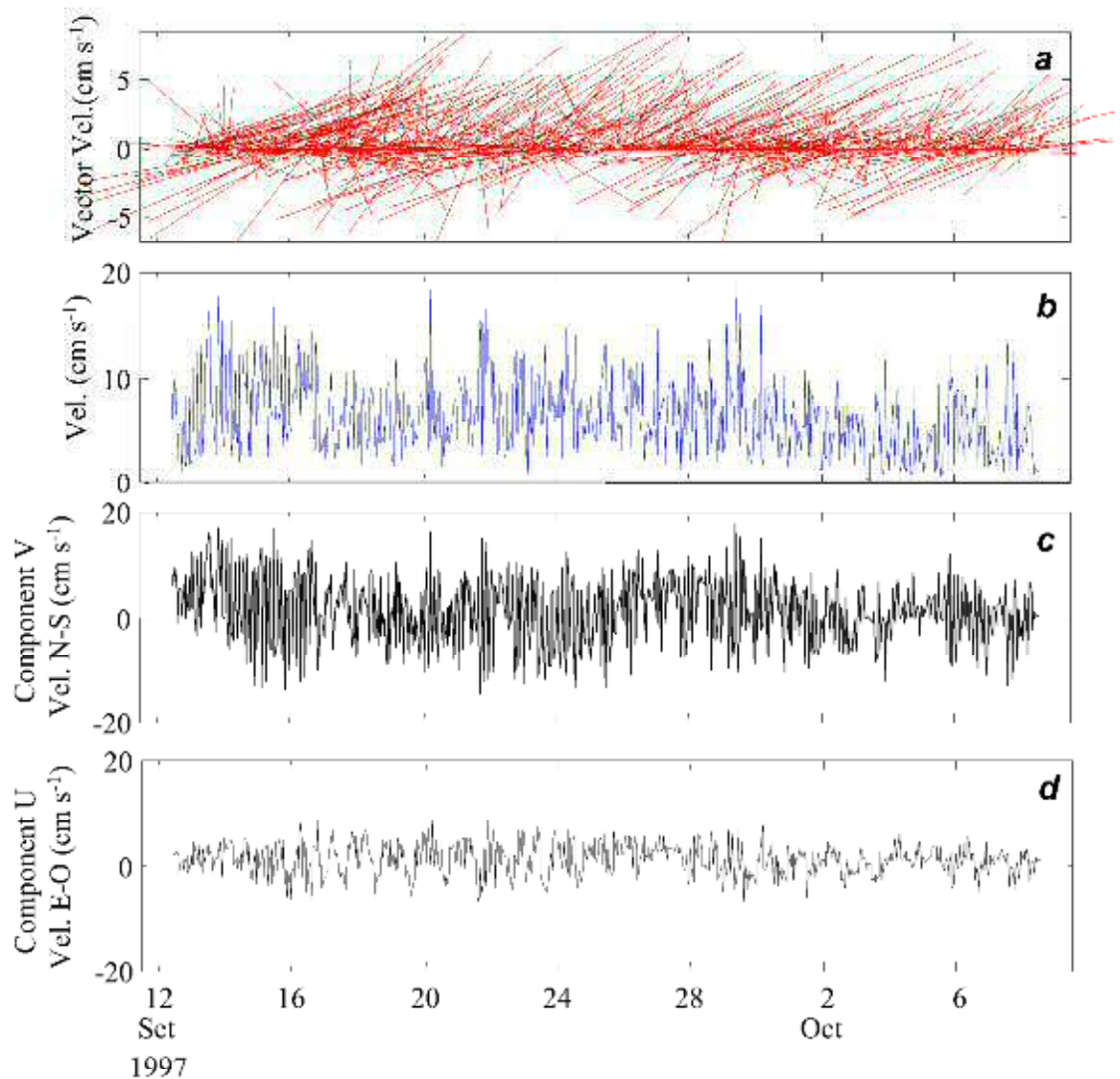


Figura 1.9 Exemple de registre de velocitat i direcció del corrent per sobre del ressalt d'entrada a la badia: (a) vectors de velocitat del corrent en coordenades geogràfiques estàndard, (b) velocitat absoluta del corrent en la seva direcció corresponent, equivalent a la intensitat del vector de velocitat de corrent (cm s^{-1}), (c) component parcial del corrent (cm s^{-1}) segons la seva base ortogonal estàndard sense rotar, V, en direcció N-S, i (d) igual que (c) però en component U (cm s^{-1}), en direcció E-O. Les dades són mitjanes horàries per al període del 12 de setembre al 8 d'octubre de 1997.

Les orientacions dels corrents mesurats a la boca de la badia mostren un patró clarament bimodal amb unes majors densitats de punts i velocitats de corrent sobre els 70° i els 250° de direcció (Figura 1.10), raó per la qual es justifica la rotació 70° en sentit horari de la base de referència. La primera de les direccions correspon als fluxos d'entrada d'aigua per la capa profunda de la badia i la segona als de sortida, totes dues sobre l'eix principal de la badia. D'aquesta forma les direccions dels nous eixos de referència són V', per a l'eix principal de la badia, i U', per al transversal a l'anterior, en els quals s'han expressat les components ortogonals de la direcció del corrent en les següents figures (sempre que no s'indiqui el contrari).

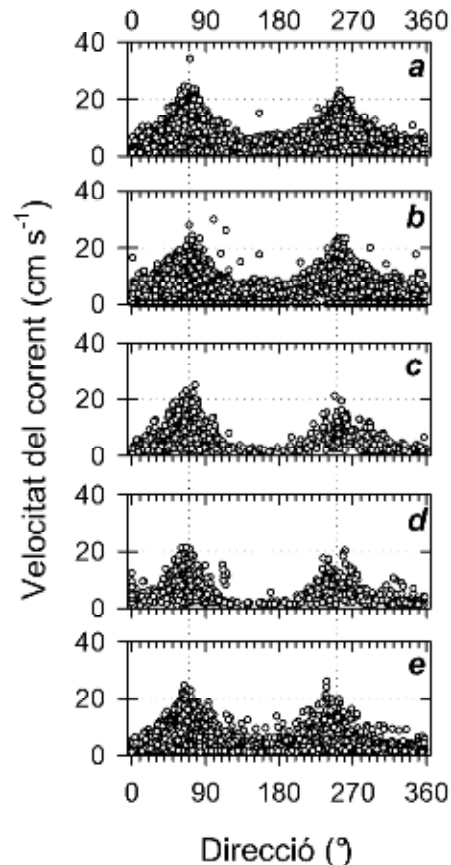


Figura 1.10 Distribució de les orientacions dels corrents d'aigua mesurats: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17-22 de setembre 1998, (d) 15-20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. S'observa com predominen dues direccions, 70° (d'entrada a la badia) i 250° (de sortida).

Els valors instantanis de la component V' del flux d'entrada oscil·len entre $+20$ i -20 cm s^{-1} , amb algun valor puntual d'entrada que pot arribar als 30 cm s^{-1} i la seva dinàmica mostra que hi ha fenòmens cíclics d'entrada i sortida d'aigua (Figura 1.11). Les velocitats en la component U' tenen intensitats molt inferiors a les del component V' i només en comptades ocasions arriben als 10 cm s^{-1} (Figura 1.12).

El corrent residual diari provoca generalment entrades d'aigua a la badia (Figura 1.13) que solen ser inferiors als 20×10^6 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$; més rarament trobem fluxos de sortida, fins a 4×10^6 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$, amb un valor extrem enregistrat l'onze de novembre de 10×10^6 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$. Els valors negatius (de sortida) apareixen en comptades ocasions com entre mitjans de setembre i mitjans d'octubre de 1997. Cal notar que sembla existir un comportament aparentment cíclic de les entrades per corrents residuals, amb períodes que semblen trobar-se entre 5 i 10 dies de valors significativament positius, seguits d'alguns dies sense gaire flux net diari. Aquests fluxos residuals en general comporten unes estimes de flux instantani que es troben dins el rang entre $+100$ i -50 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, aproximadament.

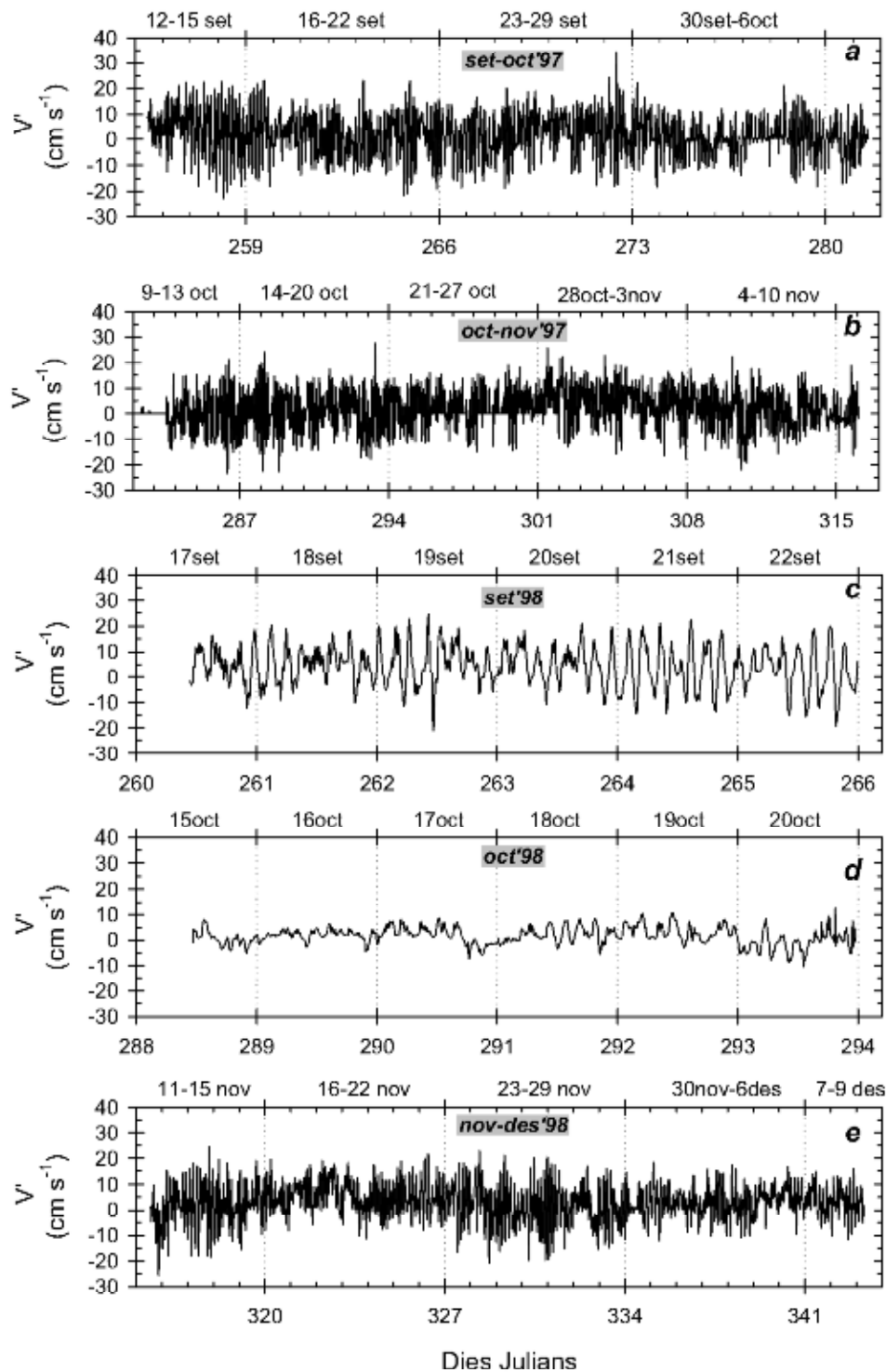


Figura 1.11 Component V' (al llarg de l'eix principal de la badia) del registre de velocitat del flux d'entrada (cm s^{-1}) mesurat pel correntímetre a Alfacs en l'estació Boca: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17 setembre - 22 setembre 1998, (d) 15 octubre - 20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. Les dades originals són registres cada 10 minuts. Els dies julians són començats a comptar des de l'1 de gener de l'any en qüestió. Valors positius són d'entrada a la badia dels Alfacs, i negatius de sortida.

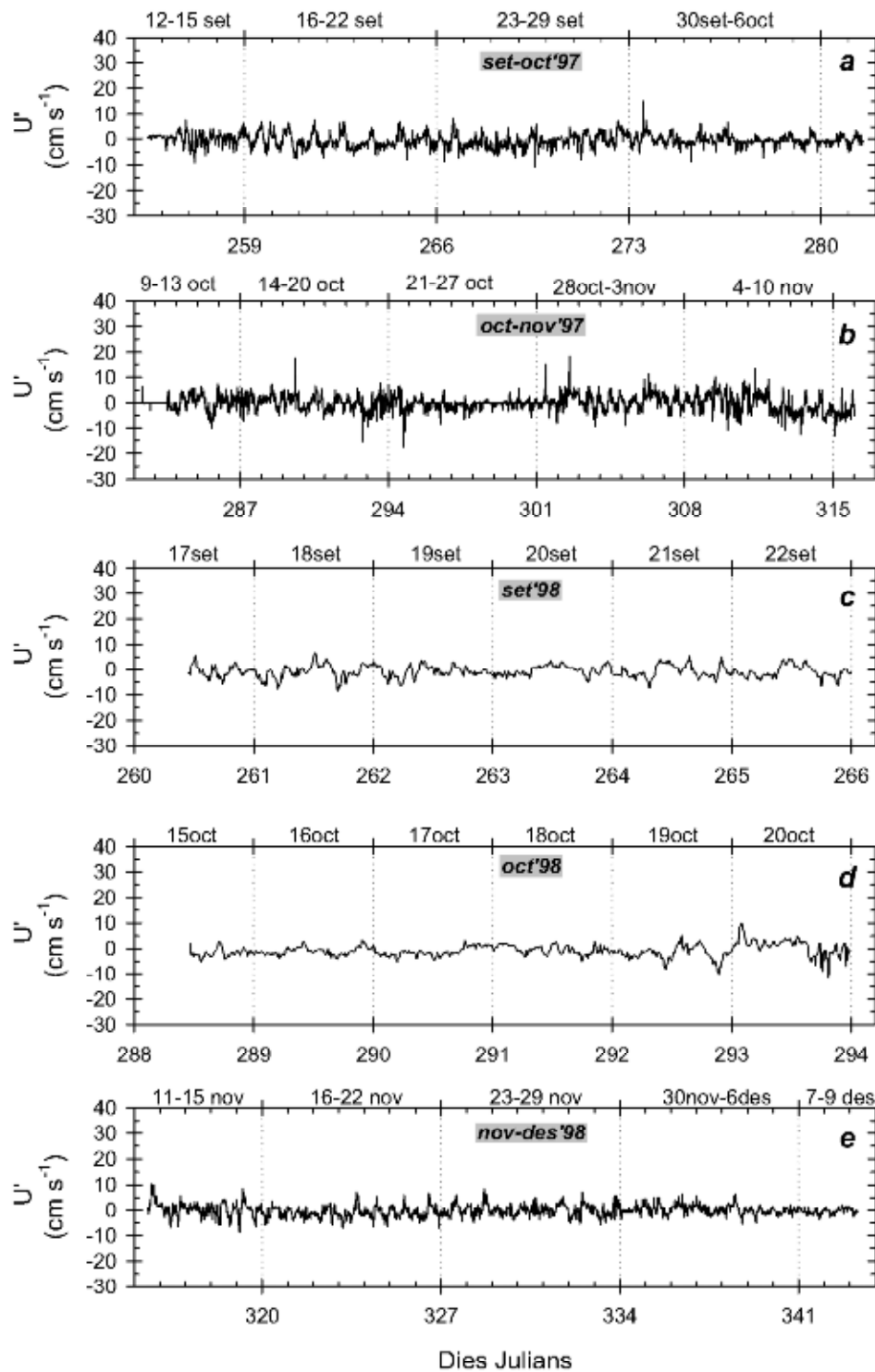


Figura 1.12 Component U' (a través de l'eix principal de la badia) del registre de velocitat del flux d'entrada (cm s^{-1}) mesurat pel correntímetre a Alfacs en l'estació Boca: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17 setembre - 22 setembre 1998, (d) 15 octubre - 20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. Les dades originals són registres cada 10 minuts. Els dies julians són començats a comptar des de l'1 de gener de l'any en qüestió. Valors positius són en sentit cap a terra ferma, i els negatius, en sentit a la península de la "Punta de la Banya".

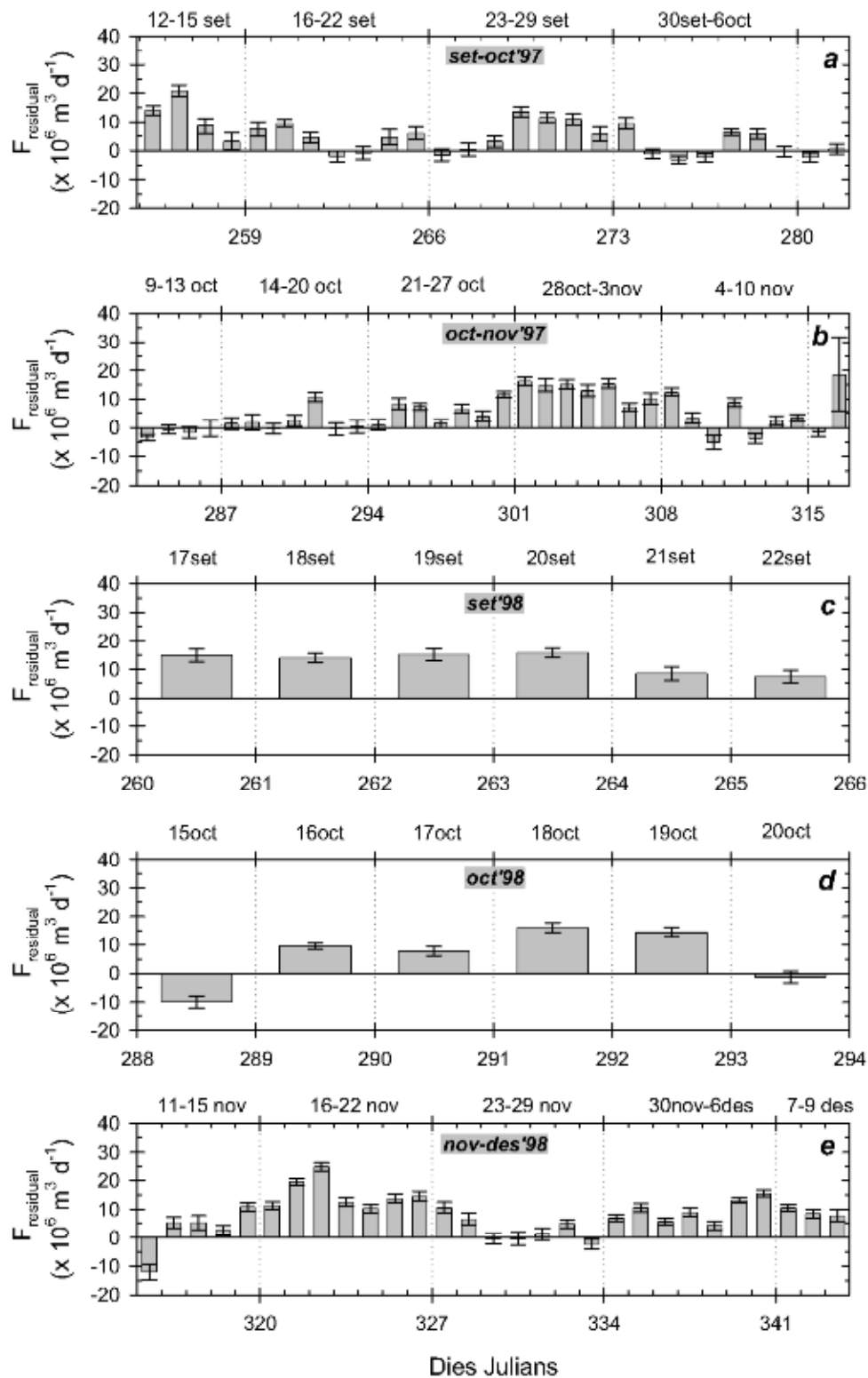


Figura 1.13 Fluxos del corrent net residual diari just per sobre del ressalt d'entrada en direcció al llarg de l'eix principal de la badia (component V'). Valors positius volen dir d'entrada i negatius de sortida. El número de dia julià de l'eix de les ordenades marca l'inici del dia en qüestió.

Vent, pluja i pressió atmosfèrica.

Els vents bufen majoritàriament de component sud-sudoest (SSW) amb situacions puntuals de fortes velocitats mitjanes de components nordoest (NW), tant en 1997 com en 1998 (Figura 1.14). En ocasions van arribar a mitjanes diàries properes a 10 m s^{-1} , però en general van ser inferiors a 3 m s^{-1} la major part de les vegades (Figura 1.15 a, a', per 1997 i 1998 respectivament). A partir dels histogrames de freqüències s'observa que el rang de direccions més freqüent és el de les components S (de SE a SW, és a dir, Xaloc, Migjorn i Garbí) i les de NW (Mestral) (Figura 1.15b i b' de 1997 i 1998). La precipitació neta (precipitació menys evaporació de referència) mostra valors negatius fins a la desena de mm d'aigua de dèficit, amb episodis puntuals que poden arribar prop dels 60 mm d^{-1} , essent una distribució de valors molt apuntada amb la moda a la classe de freqüències entre 0 i -5 mm de balanç hídric (Figura 1.15c i c' de 1997 i 1998). La pressió atmosfèrica al llarg de 1997 i 1998 s'ha mantingut entre els 1000 i els 1035 mbar, essent els valors més freqüents anualment $1019 \pm 1 \text{ mbar}$ per a 1997 i $1017 \pm 1 \text{ mbar}$ per a 1998 (Figura 1.15d i d' de 1997 i 1998).

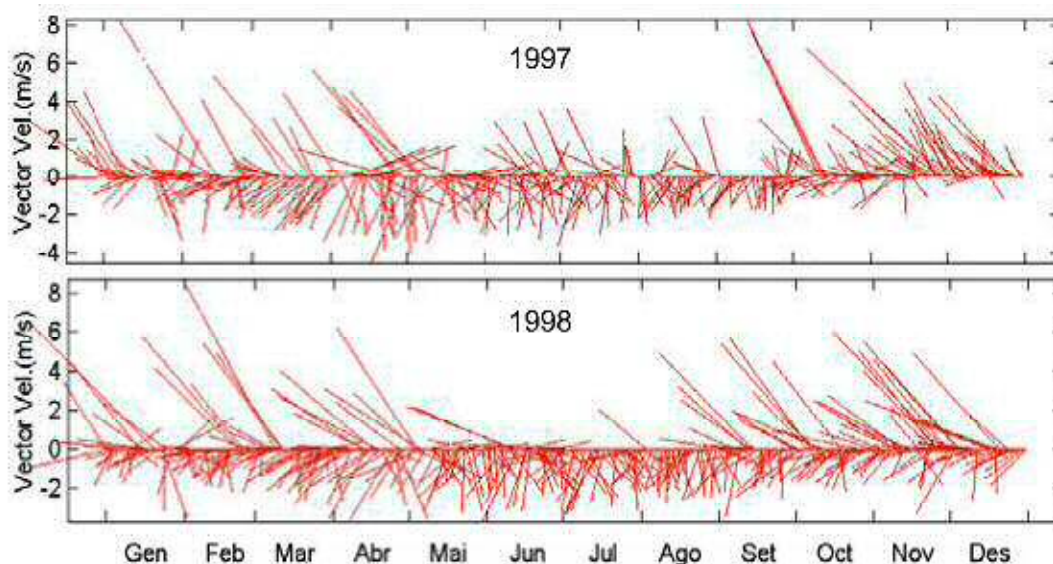


Figura 1.14 Velocitat i direcció del vent a l'estació meteorològica d'Amposta del DARP. Les dades són mitjanes diàries en 1997 i 1998.

Les variacions de pressió atmosfèrica, enteses com la diferència entre la pressió en un dia donat i el dia immediat anterior, van ser d'entre els -17 i $+13 \text{ mbar d}^{-1}$ (Figura 1.16a de 1997 i 1998). En tots dos casos la moda de la distribució es troba als zero mbar de canvi diari, i més de la meitat dels valors de cada distribució han estat entre -5 i $+5 \text{ mbar}$ (Figura 1.16a' de 1997 i 1998), amb la diferència que la pràctica totalitat de valors de 1997 es troben entre $+11$ i -11 mbars de canvi diari, i en 1998 entre $+8$ i -8 mbars , essent aquest últim histograma més apuntat que l'anterior.

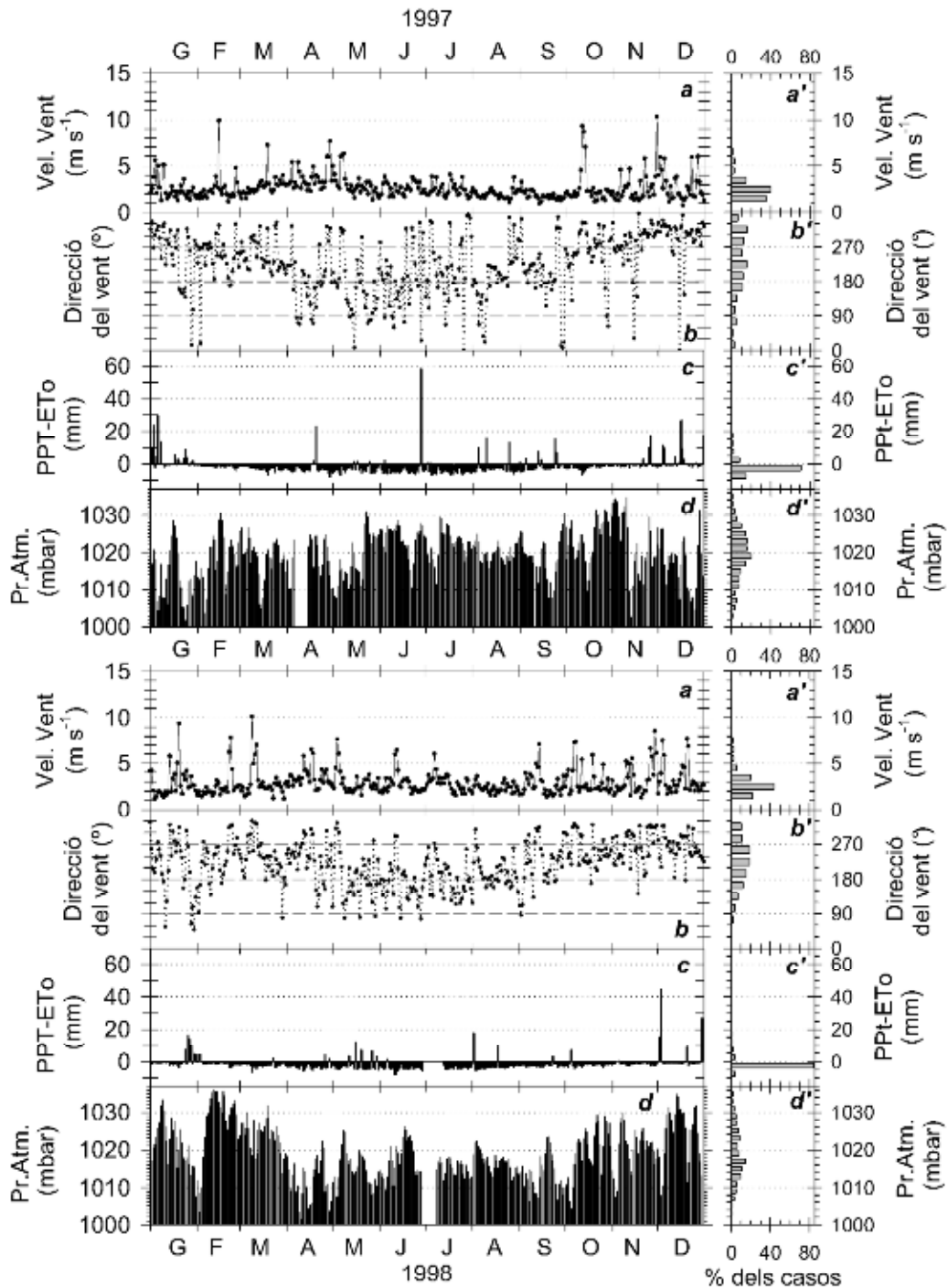


Figura 1.15 Evolucions al llarg de 1997 i 1998 de (a) velocitat del vent mitjana diària ($m s^{-1}$), (b) Direcció del vent mitjana diària ($^{\circ}$), (c) Balanç hidric a acumulat diari per via atmosfèrica (Precipitació Total menys Evapotranspiració de referència, en mm). Els gràfics de la dreta (x') representen els histogrames de freqüències d'aparició de cada valor, en unitats percentuals. Dades de l'observatori d'Amposta del DARP.

En calcular la precipitació neta al llarg de la dècada dels noranta podem observar que els anys més plujosos van ser del 1996 al 1997, amb valors entre 500 i 600 mm aproximadament, mentre que els altres 4 anys no van superar els 340 mm anuals (Taula 1.5). L'evapotranspiració de referència anual va oscil·lar entre els 930 i els 1220 mm, donant com a resultat que els anys

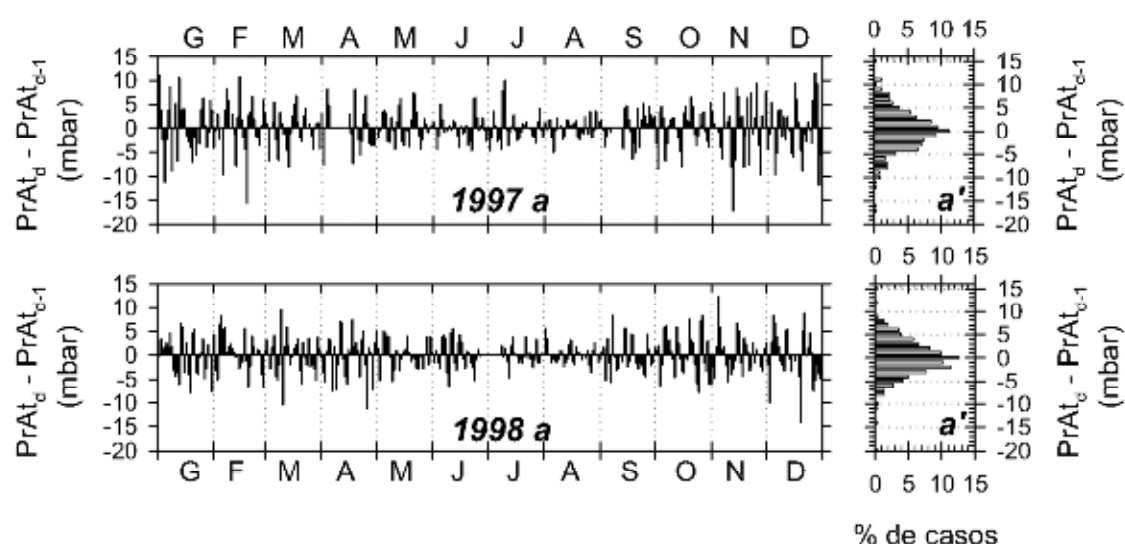


Figura 1.16 Diferència de pressió atmosfèrica diària en 1997 i 1998: (a) valors mitjans diaris de diferència entre un dia i el del dia anterior (mbar), (a') histograma de freqüències. Dades de l'estació meteorològica d'Amposta del Servei de Meteorologia de Catalunya.

Taula 1.5 Valors acumulats anuals i per estacions climatològiques de: Precipitació (Ppt), Evapotranspiració (Eto) i Precipitació neta (Ppt-Eto). Les dades són de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP. Les unitats són mm, ó $l\ m^{-2}$, i la majoria són mitjanes de prop de 90 casos, menys l'hivern de 1992, en que tan sols es diposa de 45 casos.

Dades		1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	\bar{x}
<i>Ppt</i>									
Hivern	X	32	117	27	24	173	173	111	94
Primavera	X	47	67	47	74	72	54	71	62
Estiu	X	66	55	40	108	146	146	37	85
Tardor	X	172	84	226	418	103	133	92	175
Tot l'any	Σx	316	323	339	624	493	505	311	416
<i>Eto</i>									
Hivern	X	90	127	187	191	137	142	134	144
Primavera	X	406	303	441	396	316	359	347	367
Estiu	X	408	429	461	382	323	374	429	401
Tardor	X	215	150	132	132	153	142	175	157
Tot l'any	Σx	1118	1008	1222	1100	930	1016	1086	1069
<i>Ppt-Eto</i>									
Hivern	X	-59	-10	-160	-166	36	32	-24	-50
Primavera	X	-358	-252	-394	-323	-245	-305	-278	-308
Estiu	X	-342	-374	-422	-274	-178	-228	-392	-316
Tardor	X	-43	-66	94	287	-50	-10	-83	18
Tot l'any	Σx	-802	-701	-883	-476	-437	-511	-777	-655

més secs van ser 1992 i 1994 amb un dèficit hídric anual de 802 i 883 mm, i els anys menys secs van coincidir amb els anys més plujosos, amb dèficits propers als 500 mm. L'estació més plujosa amb diferència durant la dècada dels noranta va ser la tardor en terme mig (175 mm), seguida de l'hivern (94 mm), l'estiu (85 mm) i la primavera (62 mm). Pel que fa al balanç hídric net, les estacions climatològiques es van ordenar de major a menor com tardor (+18 mm), hivern (-50 mm), primavera (-308 mm) i estiu (-316 mm).

Relacions entre variables

Els corrents mesurats en boca fons mostren una correlació lineal significativa amb la majoria de variables meteorològiques analitzades, a partir de dades horàries (Taula 1.6). Es pot observar que la màxima correlació es dona entre les dues components ortogonals de la velocitat del vent amb $r=0.68$, seguida per les correlacions de 0.40 i -0.28 entre la pressió atmosfèrica i la velocitat del vent en direcció v' i la precipitació total, respectivament. Tenen especial interès les correlacions entre les velocitats del vent i les del corrent, també significatives com totes les anteriors, i de prop de 0.10 en tots els casos, mostrant un cert efecte significatiu, si bé molt baix, sobre el conjunt de la sèrie temporal del corrent marí de fons. Altres trets destacables són la correlació significativa de la pressió atmosfèrica amb totes les altres variables analitzades, manifestant la influència que hi juga a través del pas de fronts atmosfèrics en el vent, precipitació i corrent marí de fons observat. La precipitació no es va correlacionar amb el corrent residual al llarg de l'eix principal de la badia (ni d'entrada ni de sortida).

Taula 1.6 Correlacions entre les components del corrent en boca fons i les variables meteorològiques. Calculat com a exemple amb les dades de novembre – desembre de 1998. Es mostren en negreta i ombrejades les correlacions lineals estadísticament significatives ($p<0.05$).

	Cu' (cm s ⁻¹)	Cv' (cm s ⁻¹)	Vu' (m s ⁻¹)	Vv' (m s ⁻¹)	PPT (mm)	PR (hPa)
Cu' (cm s ⁻¹)	1					
Cv' (cm s ⁻¹)	-0,25	1				
Vu' (m s ⁻¹)	0,09	0,12	1			
Vv' (m s ⁻¹)	0,10	0,13	0,68	1		
PPT (mm)	0,09	-0,01	0,19	-0,02	1	
PR (hPa)	-0,11	0,10	0,11	0,40	-0,28	1

El coeficient de correlació entre el corrent residual diari i variables com la precipitació neta, la pressió atmosfèrica i la velocitat del vent en les direccions longitudinal (V') i transversal (U') de la badia va resultar de 0.09, 0.07, 0.47 i 0.09, respectivament ($n=103$), dels quals només el del vent longitudinal va ser estadísticament significatiu ($p<0.001$). El diagrama de dispersió de valors de les dues variables (Figura 1.17) mostra que la majoria de punts es troben en la franja de fluxos positius respecte velocitats longitudinals negatives, i en especial predominen majoritàriament els punts de fluxos positius, independentment de la velocitat del vent longitudinal.

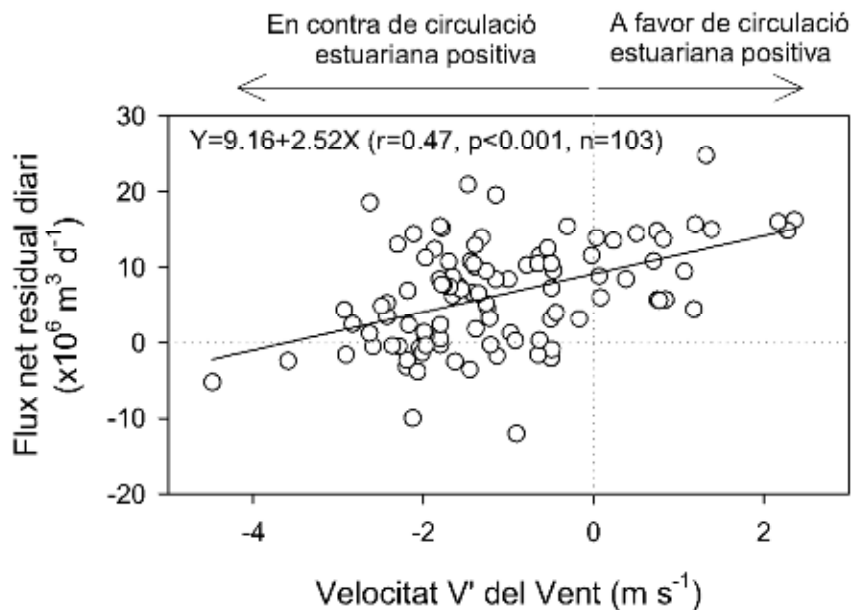


Figura 1.17 Diagrama de dispersió entre el flux net residual diari i la velocitat longitudinal del vent, ambdós eixos mostren les seves components V' . Es mostra la recta de regressió lineal entre ambdues variables: $Y=9.16+2.52X$ ($r=0.47$, $p<0.001$, $n=103$).

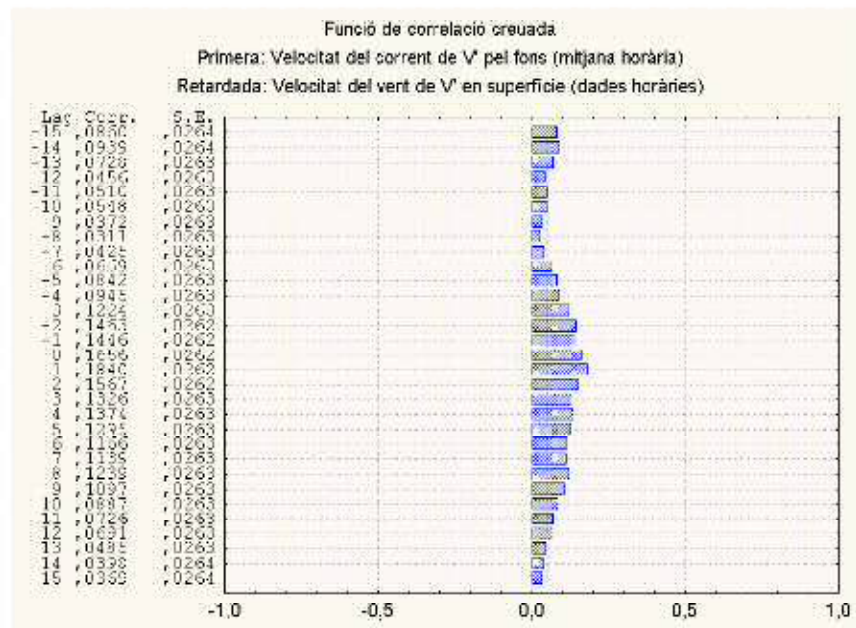


Figura 1.18 Correlació creuada entre la velocitat V' del vent i la velocitat V' del corrent de fons per sobre del ressalt. Fet a partir de mitjanes horàries de les dades. Cal recordar que la direcció del vent indica d'on ve el vent, i la del corrent cap a on va, raó per la qual els vents V' positius van en sentit oposat al dels corrents V' de fons positius. Valors de correlació positiva indiquen que el vent que bufa en un sentit està potenciant la circulació d'aigua de fons en sentit contrari dins de la mateixa direcció V' d'actuació.

L'anàlisi de la correlació creuada entre les velocitats longitudinals (V') del vent i el corrent de fons per sobre del ressalt (Figura 1.18) indica que el màxim efecte del vent sobre el corrent es detecta pel voltant d'una hora més tard d'haver començat a bufar el vent, essent aquest coeficient de correlació

igual a 0.184 i estadísticament significatiu ($n=1454$, $p<0.05$). Un patró similar es detecta amb la precipitació neta, que afecta al corrent per sobre del ressalt augmentant de forma significativa la seva velocitat d'entrada entre 7 i 10 hores després d'haver plogut (Figura 1.19, $n=1454$, $p<0.05$).

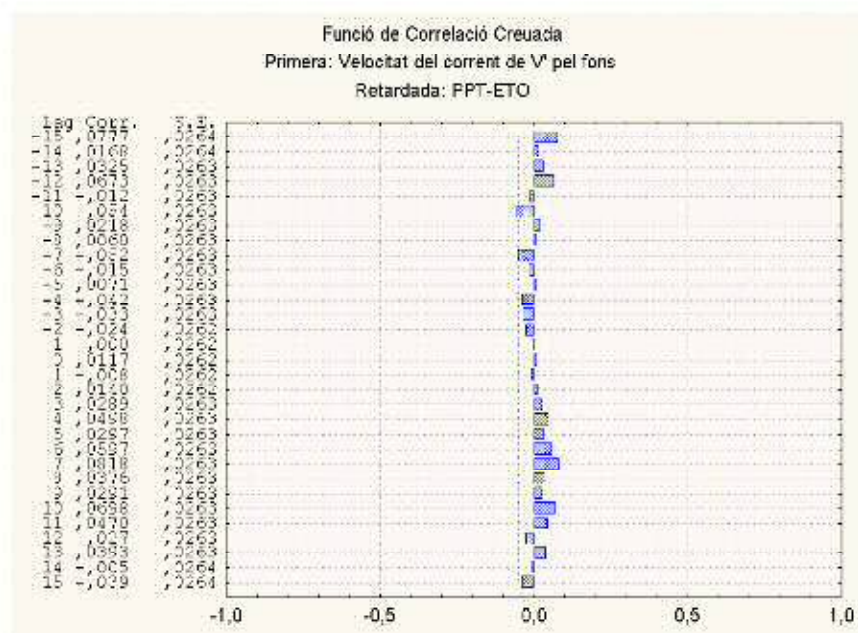


Figura 1.19 Correlació creuada entre la precipitació neta (PPT-Eto) i la velocitat V' del corrent de fons per sobre del ressalt. Fet a partir de mitjanes horàries de les dades.

Cal notar que aquestes correlacions, si bé són estadísticament significatives, són molt baixes pel comportament oscil·latori de les sèries entre les que s'ha calculat la correlació, i tenen intervals temporals d'acoblament i de desacoblament alternats entre les sèries. Per aquesta raó, la correlació entre dues sèries temporals senceres (d'una setmana o d'un mes de durada i amb dades cada 10 minuts o dades horàries) dóna una correlació baixa si s'analiza tot el conjunt de la sèrie de cop. Per aquesta raó es van analitzar les correlacions per trossos de diferent mida de les sèries temporals (dependent d'escala), com s'explica tot seguit.

Correlacions dependents d'escala (SDC)

La correlació dependent d'escala entre la velocitat del corrent longitudinal (V') sobre el ressalt i la velocitat del vent longitudinal (V') indica que en general les dues variables no estan acoblades excepte en dies puntuals. En el període de novembre a desembre de 1998 l'acoblament només es produeix al voltant dels dies 18 de novembre i 27 de novembre (Figura 1.20), tal i com s'observa per l'acumulació de punts en aquesta regió del gràfic i per l'augment relatiu de les correlacions mitjanes parcials. Val a dir que aquesta correlació és positiva sobre la diagonal principal del gràfic, és a dir, sense decalatge temporal entre les dues sèries.

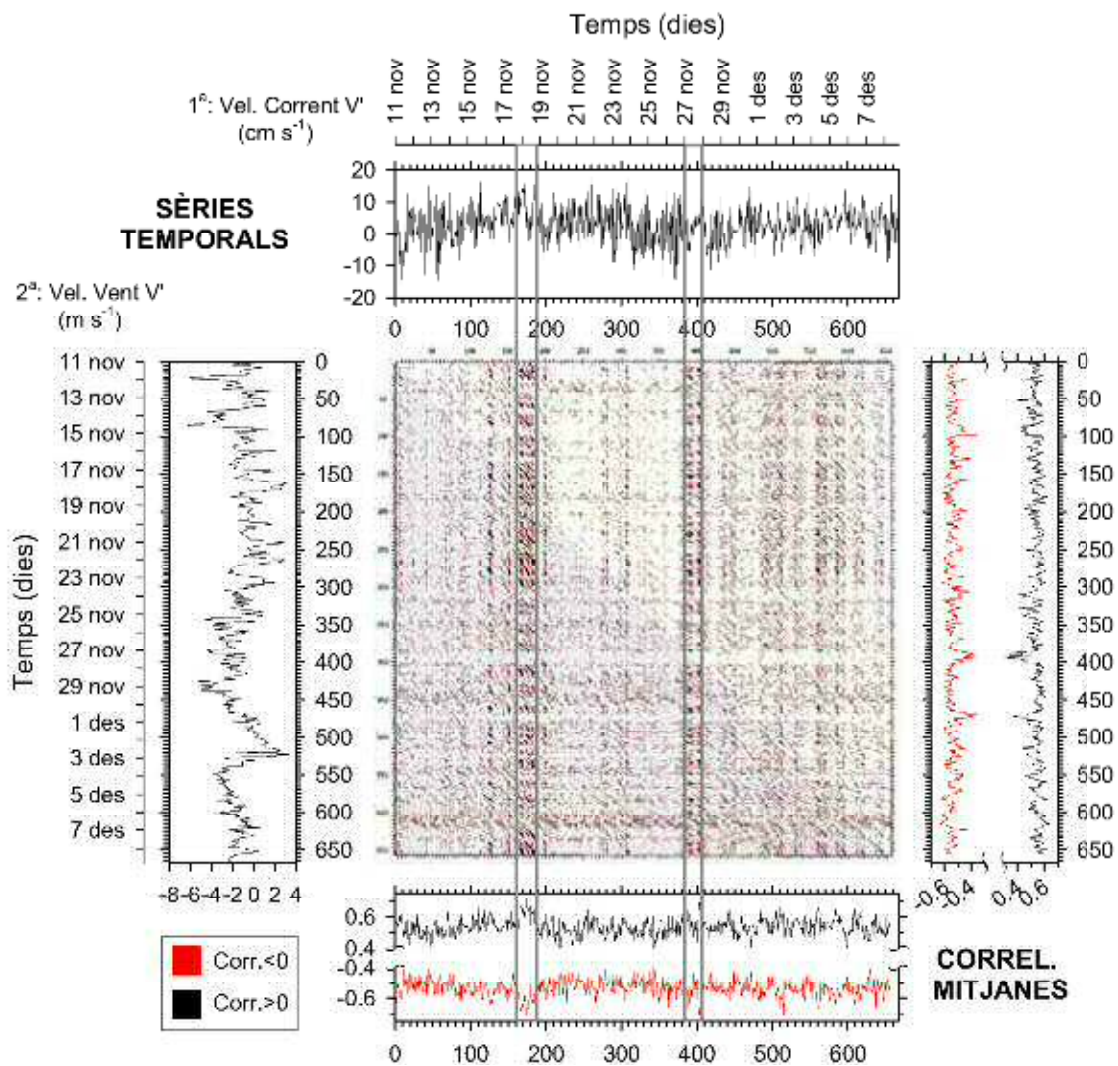


Figura 1.20 Anàlisi de correlació depenent d'escala (SDC) entre: 1^a sèrie (dalt): velocitat V' del corrent sobre el ressalt, i 2^a sèrie (esquerra): velocitat V' del vent. Les dades són mitjanes horàries de cada variable entre 11 de novembre i 8 de desembre de 1998. Mida del fragment d'escala: 12h. Els dos requadres verticals s'han dibuixat amb l'únic objectiu de ressaltar les àrees del gràfic que corresponen als intervals de temps en que la primera sèrie mostra acoblament amb la segona. Veure text per a més informació sobre el mètode.

L'anàlisi SDC a una resolució temporal més fina entre l'alçada de la columna d'aigua i la velocitat V' del corrent per a un període de 9 dies mostra un quasi continu acoblament al llarg de tot el domini de valors del gràfic de correlacions (Figura 1.21 central, parar especial atenció en les marques de correlació que segueixen la diagonal principal del gràfic al llarg de quasi tot el seu recorregut). Només alguns dies puntuals hi ha un desacoblament entre les dues variables, tal i com es pot interpretar de les bandes blanques que travessen la diagonal principal del gràfic verticalment o horitzontal. En general s'observa que la banda blanca vertical més important de totes es troba cap al dia 12 de novembre, sense que hi hagi cap màxim o mínim relatiu de les velocitats del corrent per sobre del ressalt que ho expliquin (Figura 1.21b i c), però sí de les velocitats del vent V' i U' (Figura 1.21d i e, respectivament). Els vents de

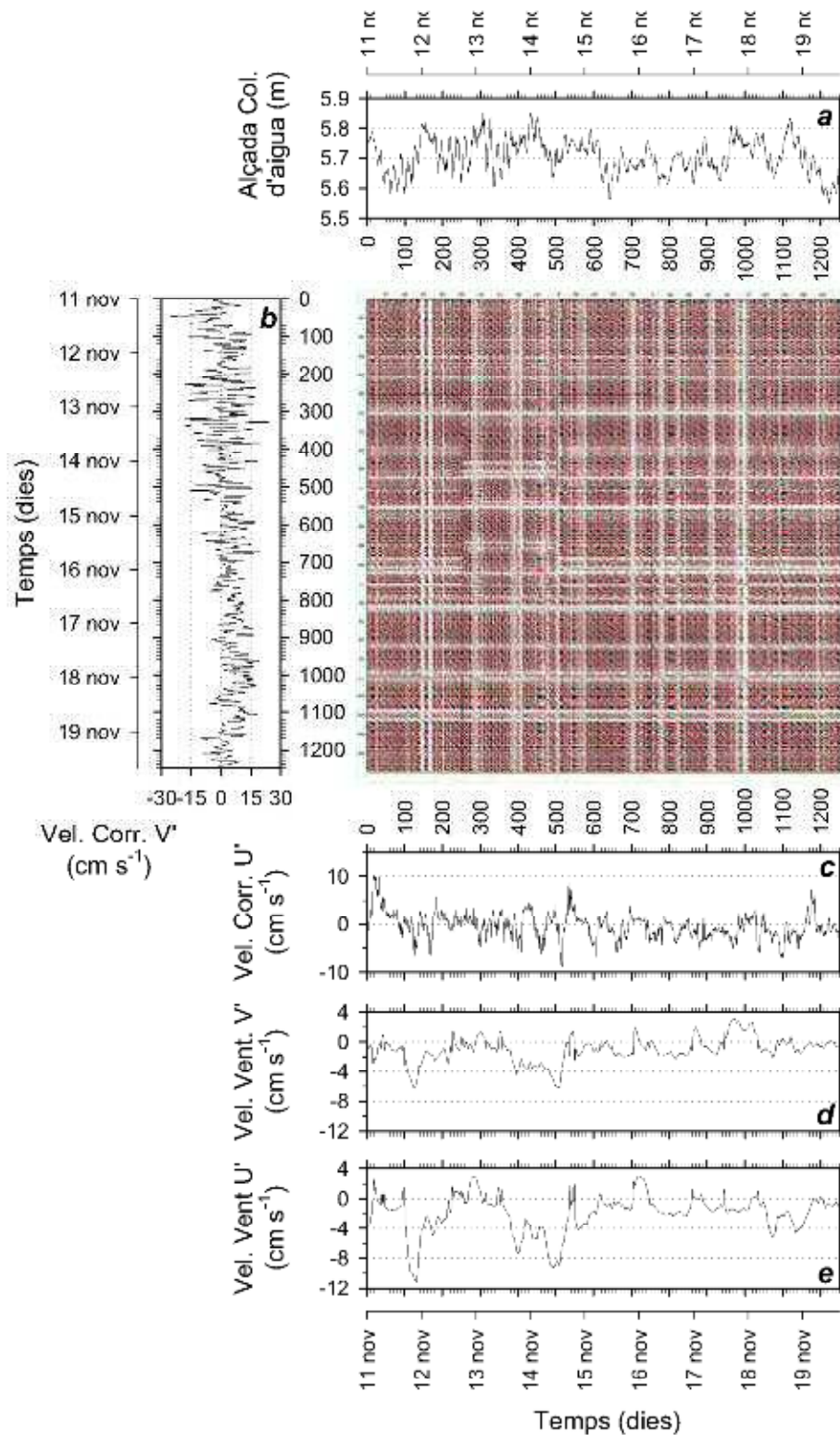


Figura 1.21 Anàlisi de la correlació depenent d'escala (SDC) entre: 1a Sèrie (dalt, a), alçada de la columna d'aigua, i 2a Sèrie (esquerra, b), velocitat V' del corrent sobre el ressalt. La freqüència de dades és cada 10 min, entre l'11 i el 19 de novembre de 1998. Mida del fragment d'escala: 2h. S'ha representat també per comoditat d'interpretació dels patrons de l'SDC altres sèries temporals a sota: (c) velocitat U' del corrent, (d) velocitat del vent V', (e) velocitat del vent U'. Veure text per a més informació sobre el mètode.

component U' (transversals a la badia) mostren el màxim negatiu més elevat de tot l'interval mostrat, el que equival als vents de Mestral de major velocitat d'aquests nou dies d'observació (Figura 1.21e). Per altre costat, la banda blanca horitzontal que més destaca correspon al dia 18 de novembre (Figura 1.21 gràfic central). L'única peculiaritat que té aquest dia en el que fa referència a la velocitat de corrent i del vent és que va anar acompanyat de Mestrals ben definits de prop de 4 ms^{-1} (en absència de velocitats de vent en la direcció V'). Un Mestral d'aquest estil també va actuar a finals del 14 de novembre, moment en el que també s'observa un desacoblament puntual de la velocitat del corrent en V' , acompanyada d'un màxim relatiu de velocitat positiva en U' . En el següent pas d'anàlisi entrarem en un grau d'observació temporal més fi, per tal de poder analitzar millor les relacions entre les variables en l'escala de les poques hores així com el temps de decalatge entre les possibles forces motrius i l'oscil·lació que provoquen en l'alçada de la columna d'aigua.

La relació entre l'alçada i el corrent longitudinal genera uns patrons de taques diagonals en el gràfic, que són els característics de dues variables que estan acoblades (Figura 1.22b). Pel contrari, quan hi ha abundants taques verticals i oscil·lant entre negres i vermelles (correlacions positives i negatives, respectivament), les dues variables oscil·len en freqüències diferents i es dedueix que no estan acoblades (Figura 1.22c i d). Totes tres anàlisis de SDC mostren la mateixa doble banda clara vertical, la primera d'elles cap a l'instant 145-150 del temps i la segona prop d'unes 20 unitats relatives de temps³ més tard. S'observa que cap a la unitat de temps 110 el vent assoleix una velocitat de -8 m s^{-1} de direcció transversal a la badia (Mestral, Figura 1.22d) i aquesta és manté sobre aquest valor fins la unitat de temps 137. Poc més d'un hora més tard (6 unitats relatives de temps) de deixar de bufar el vent per sobre d'aquest llindar es perd l'acoblament entre la velocitat del corrent V' i l'alçada de la columna d'aigua (primera banda blanca vertical de tots tres gràfics centrals). I unes 3.6 hores més tard (prop de 20 unitats relatives de temps) torna a aparèixer la segona banda blanca vertical, però aquesta vegada sense anar lligada a un altre màxim relatiu de velocitat U' del vent. Cal notar que entre totes dues bandes blanques hi ha hagut una banda nova d'acoblament entre les dues sèries, malgrat només d'un hora de durada.

³ Aquestes unitats relatives de temps equivalen a nombre de dades de freqüència 10 minuts, que dividides per 6 ens donen l'hora acumulada des que va començar el registre.

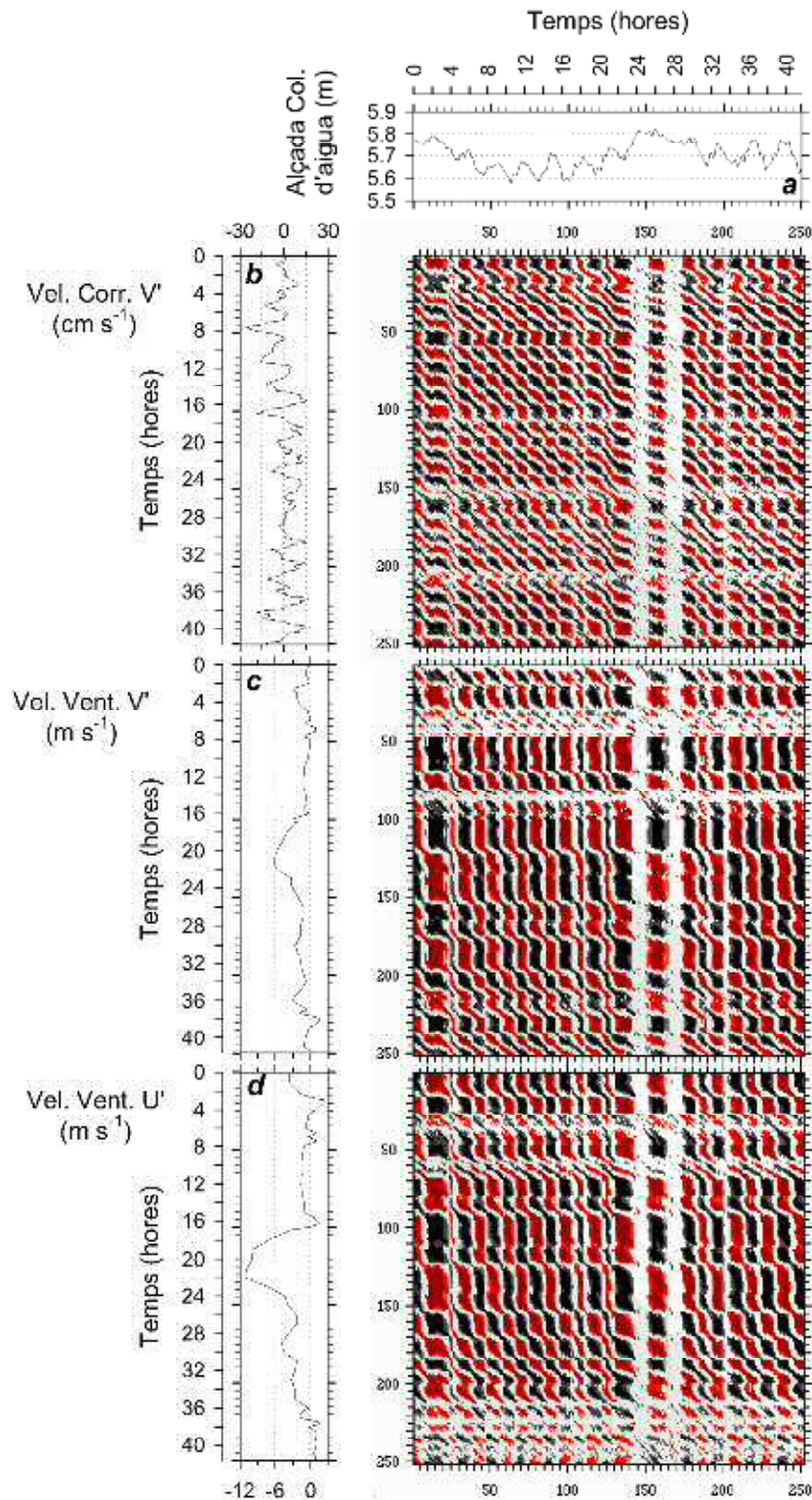


Figura 1.22 Anàlisi de la correlació depenent d'escala (SDC) entre: (dalt, a), alçada de la columna d'aigua, (esquerra superior, b), velocitat V' del corrent sobre el ressalt, (esquerra mig, c) velocitat V' del vent, (esquerra inferior, d), velocitat U' del vent. La freqüència de dades és cada 10 min, a partir de les 13:00h de l'11 de novembre de 1998 (1.7 dies). Mida del fragment d'escala: 2h. Veure text per a més informació sobre el mètode.

Discussió

Els fluxos d'entrada d'aigua de mar a la badia estimats pel mètode del model de caixes en estat estacionari aplicat a dies concrets de mostreig (Figura 1.6) són superiors als mesurats pel correntímetre en calcular el flux net residual diari (Figura 1.13). El cas extrem dels resultats, per a la situació de l'1 d'octubre de 1997 en què són de l'ordre de $100 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, es troba un ordre de magnitud per sobre del flux net residual mesurat aquells dies, que no va superar els $10 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Aquest mètode del model de caixes en estat estacionari, per tant, no serveix per mesurar el flux net residual diari per a intervals de temps de l'ordre d'un dia, en els casos en que no es compleixen les condicions d'estat estacionari.

Les estimes a través dels canvis d'alçada en la columna d'aigua (Figura 1.8) donen uns valors un ordre de magnitud inferior als mesurats amb el correntímetre, per que la major part del flux net es produeix sense que hi hagi canvis en el volum d'aigua de la badia.

Sens dubte, les millors mesures d'intercanvi les obtenim amb el correntímetre. A partir d'aquestes dades discutirem la magnitud possible dels components del corrent marí d'entrada a la badia.

Components del corrent observat

Marea astronòmica

Pel que fa a la marea astronòmica, si es considera una amplitud mareal⁴ d'uns 15 cm sobre els 44 Km² de la badia, llavors existeix una entrada i sortida d'uns $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ dos cops al dia (amb la marea), és a dir, uns $1.10 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, (ó $306 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), que provoquen una velocitat del corrent d'uns 9 cm s^{-1} d'entrada per la boca de la badia (la secció de la qual podem aproximar a 3500 m^2 segons Camp (1991), 1.17 km d'ample per 3 m d'alçada de la capa profunda per sota la piconoclina). Aquest flux cíclic mareal és teòricament estacionari en balanç diari, i podria afectar a les eventuais hipòxies en tant en quant genera un intercanvi d'oxigen entre dins i fora de la badia. De totes formes, si tenim en compte que el volum total de la capa fonda de la badia és de prop de $97 \times 10^6 \text{ m}^3$, el volum d'aigua entrat per boca a causa de la marea ($6,6 \times 10^6 \text{ m}^3$) afectaria tan sols al 7% del volum de la capa fonda, i el més proper a la boca. A més, si comptem que l'entrada d'aigua es pot produir a través d'un rectangle de 1.17 km d'amplada per 3 m d'alçada com a molt, els $6.6 \times 10^6 \text{ m}^3$ arriben a entrar tan sols 1.9 km dins la badia en una zona que presenta valors de concentració d'oxigen similars a les de la massa d'aigua exterior a la badia. Per últim, si tenim en consideració que les hipòxies, quan es generen, ho fan a la zona més interior de la badia (a partir de 5 km de distància de la boca de la badia, veure Figura 3.3a, b, c, plana 130), podem concloure que el component mareal no afecta significativament a les concentracions d'oxigen de l'aigua dels Alfacs, més enllà de les de l'estació *Boca*, en què contribueix a mantenir-les equilibrades amb les de mar obert.

⁴ L'amplitud mareal és igual a la meitat del rang d'oscil·lació diària màxima de la marea.

Diferències de densitat

Els aportos hídrics generen un flux total de sortida d'aigua a mar obert superior al flux d'aigua dolça entrat a l'estuari. Aquesta relació de fluxos hauria de ser característica de la barreja mareal i circulació estuariana de cada sistema (Kester *et al.* 1996). A la badia dels Alfacs el flux d'aigua de sortida de la badia cap a mar obert és de l'ordre d'entre 11 i 15 vegades més gran que el flux d'aigua dolça pels canals (Figura 1.5b2, b1, respectivament, a partir de dades de Camp 1994).

Si aquests valors (11 i 15) fossin certs, això ens duria a disquisicions de considerar que el component del flux d'entrada pel fons de la badia dels Alfacs per diferències de densitat hauria de ser de l'ordre de $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per la situació de canals tancats i mínim treball de l'aigua dolça generant flux de sortida, i $150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ per la situació de canals oberts i màxim treball de l'aigua dolça (Taula 1.7). En dividir aquests fluxos per la secció estimada d'entrada de 3500 m^2 s'obtenen entre 1.1 i 4.3 cm s^{-1} de velocitat del flux net d'aigua salada. Val a dir que si expressem els valors de referència de flux net residual diari mesurats pel correntímetre (-5 i $20 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, Taula 1.7), en termes de velocitat de flux instantània (cm s^{-1}) per tota la secció d'entrada a que ens referíem abans, aquests es converteixen en -1.71 i 7.14 cm s^{-1} . És a dir, expressat en termes de velocitat del corrent marí, aquesta entrada extra d'aigua salada a causa dels aportos d'aigua dolça pot representar una part molt considerable (més del 50 %), respecte la velocitat instantània total mesurada pel correntímetre a sobre del ressalt.

Taula 1.7 Resum de l'ordre de magnitud (observat o previsible) del flux net residual diari (expressat en $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, ó en $\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) de la Badia dels Alfacs. Es dona el valor mínim i màxim observat o estimat, segons cada cas.

	Flux net instantani		Flux net residual diari	
	$\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$		$\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$	
Mesurat, Correntímetre ^a	-60	230	-5	20
Estimat parcial de component per:				
<i>marea</i> ^b	-300	300	0	
<i>densitat</i>	40 ^c	150 ^c	3,4	13
<i>Vent (sense fricció)</i> ^d	-130	360	-31	12
<i>pressió atmosfèrica</i>	-53	53	-4,4	4,4

^a Col·locat a l'estació de mostreig *boca fons* en el seu costat limitrof amb mar obert (*estació exterior fons*) de setembre a novembre 1997.

^b Considerant la marea astronòmica i l'oscil·lació produïda per l'ona estacionària superficial.

^c Assumint flux continu de la mateixa direcció i sentit que el flux net residual diari estimat pel model de caixes en estat estacionari.

^d Només la seva component *V* (l'única correlacionada significativament amb el flux net residual d'aigua), a partir de l'aproximació de Gill (1982) per a mar obert, que no té en compte que a la badia dels Alfacs hi ha fricció de les masses d'aigua amb les vores i el fons.

Influència del vent

Val a dir que s'ha invertit un considerable esforç en analitzar la relació del vent amb diferents variables i a diferents escales, a causa de discrepàncies entre diversos equips de recerca consultats

sobre la previsible capacitat del vent d'influir en la hidrodinàmica de la badia dels Alfacs i l'estabilitat de la seva columna d'aigua. Es discuteix tot seguit la rellevància dels resultats trobats, en que no s'ha observat que el vent jugui un paper rellevant en el corrent residual diari ni en la dinàmica d'estuari positiu bicapa de la badia, més enllà d'influir en episodis puntuals, com seguidament veurem.

A partir de les dades de que es disposa s'ha trobat una relació molt baixa entre el flux net residual d'entrada d'aigua de mar i el vent longitudinal (component V' o direcció WSW-ENE), i no s'ha trobat cap relació general amb el vent de direcció transversal a la badia (component U', ó direcció NNW-SSE, Taula 1.6). A partir de la Figura 1.17 es pot deduir que en general la badia funciona com un estuari positiu de manera força independent de la velocitat i direcció del vent, pel que s'ha de pensar que el principal factor motor d'aquest funcionament no és el vent, sinó un altre. Quan bufa de procedència ENE, el vent actua accelerant aquest patró de circulació, malgrat siguin comptades les ocasions en què apareix aquest tipus de vent a la badia (Figura 1.14). Quan bufa en sentit contrari, tendeix a alentir-lo, i s'estima que només arribaria a revertir-lo momentàniament quan la seva velocitat mitjana diària fos aproximadament superior a 3.63 m s^{-1} (de procedència WSW). En aquest cas, de totes formes, en reduir-se la circulació estuària i en cas de mantenir-se el flux d'aigua dolça a través dels canals, augmentaria el gradient de pressió i, per tant, l'efecte del vent aniria esmorteint-se, especialment durant l'època amb els canals oberts.

Es pot calcular una estima teòrica de l'ordre de magnitud del flux net residual diari atribuïble només al vent a partir de l'aproximació de Gill (1982) esmentada a la introducció. D'aquesta forma, als vents longitudinals mitjans diaris d'entre -3.59 i 1.32 m s^{-1} (per tant, de procedència WSW els primers i ENE els segons) entre novembre i desembre de 1998 els correspondria uns corrents d'aigua de 10.8 i -4.0 cm s^{-1} desplaçats 15 cap a la dreta de la direcció del vent. Per una secció d'entrada d'aigua de 3500 m^2 , el flux net diari d'entrada d'aigua de mar estimat és un ordre de magnitud superior que el rang del component del corrent pels altres factors (Taula 1.7). Ara bé, cal no oblidar que aquesta aproximació prové d'escenaris a mar obert, i s'ha de considerar amb reserves per a badies costaneres, on hi ha fricció amb les vores, la piconclina i el fons, raó per la qual el component del vent seria molt inferior. Restaria estimar el grau de reducció del component de moviment pel vent a causa de la fricció, per tal de fer aquest component més comparable amb els altres, per al cas concret de la Badia dels Alfacs.

En moltes altres badies d'arreu del món, el vent local juga un paper predominant controlant la circulació general del sistema (Weisberg 1976, Svendsen i Thompson 1978, Baker i Pond 1995), i la renovació de l'aigua de la capa fonda (Cannon i Ebbesmeyer 1978, Helle 1978). Fins i tot, existeixen treballs que han trobat relació entre els vents costaners, de major escala que els vents locals, i la circulació longitudinal del sistema estuària en la Badia de Chesapeake (Elliott 1978, Wang i Elliott 1978, Wang 1978), en diversos fiords del SW de Noruega (Svendsen 1977, Svendsen 1980), l'estret de Juan de Fuca (Holbrook i Halpern 1977, Laird *et al.* 1978) i badia Resurrection (Muench i Heggie 1978). Per la badia dels Alfacs, no existeix cap estudi similar fins a la data, i només s'han detectat episodis puntuals de control de la circulació estuària per part del vent.

Episodis puntuals d'acoblament entre vent i corrent

En analitzar la relació entre el vent longitudinal i el corrent d'aigua longitudinal a escala horària o cada 10 minuts, per a la badia dels Alfacs, s'ha observat que l'únic moment en que es detecta acoblament entre les dues sèries ha estat quan el vent va bufar unes 10 hores seguides de procedència NE (Figura 1.20, Figura 1.21d), amb una velocitat mitjana diària va ser de 1.32 m s^{-1} . Això es dedueix de què la sèrie de velocitat del vent V' mostra un màxim relatiu de valors positius cap al dia 18 de novembre, quan sobre la diagonal principal del gràfic central s'observa una acumulació de punts de correlació positiva. És a dir, en els casos en que el vent bufa paral·lel a la costa catalana davant del Delta de l'Ebre de forma intensa de NE a SW és capaç d'arrossegar l'aigua superficial cap en fora de la badia. Aquest corrent, a la seva vegada, genera un contracorrent per la capa fonda de sentit contrari al superficial, que és el corrent correlacionat positivament amb el vent de procedència NE. Fenòmens similars s'han descrit en altres badies o fiords (Johannessen 1968, Gade 1968, Bell 1973). En canvi, els episodis de vents continuats en sentit contrari (durant el vespre de l'11 de novembre de 1998 i del 13 al 14 del mateix mes) no arriben a modificar significativament la velocitat del corrent longitudinal d'entrada d'aigua marina (no s'observa correlació significativa en aquesta part de la Figura 1.20). De fet, amb els resultats mostrats a la Figura 1.17 ja es dedueix que només en els casos més extrems de vents de procedència WSW s'arriba a revertir momentàniament el sentit de la circulació estuariana, i per als vents més febles de la mateixa procedència es presumeix que no tenen un efecte significatiu per que han de treballar en contra de la inèrcia de la massa d'aigua en moviment constant segons la circulació estuariana.

Un altre episodi concret en que s'ha observat un efecte notable del vent, malgrat produir efectes diferents, va ser el d'un temporal de Mestral cap a finals de Novembre (Figura 1.21). Aquest vent de procedència NNW que va assolir velocitats mitjanes horàries de fins a 11.1 m s^{-1} va generar molt probablement una ona de superfície que va travessar la badia de costat a costat en la seva mateixa direcció, i d'aquí el primer desacoblament mostrat en la Figura 1.22 a la hora número 24. El segon desacoblament es produeix a les 3.6 hores d'haver-se produït el primer, i es podria atribuir al retorn de l'ona de superfície en rebotar sobre la plataforma sud de la badia.

Diferències de pressió atmosfèrica

Recordem, tal i com s'ha introduït a la metodologia, que es pot establir que per a diferències diàries d'1 mbar de pressió atmosfèrica es generen diferències inversament proporcionals en la columna d'aigua d'1 cm d'alçada. Aquesta diferència diària d'1cm, per exemple (agafem el cas d'una diferència positiva), suposa que per als 44 km^2 de superfície total de la badia haurien hagut d'entrar uns $0.44 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, o l'equivalent $5.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Taula 1.7). I si les diferències oscil·len entre -10 i $+10$ mbar, el flux corresponent que han d'haver generat es troba entre -4.4 i $+4.4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$. Així, els valors del component baromètric del corrent residual diari són de l'ordre de fins a un terç dels valors màxims calculats per la badia a partir de les mesures del correntímetre (Figura 1.13). En situacions puntuals, doncs, el seu efecte pot ser important per modificar el corrent residual.

No s'han trobat altres estudis que analitzin l'efecte dels canvis de pressió atmosfèrica sobre el flux net residual diari d'una badia amb els que comparar els nostres resultats.

A mode de resum...

El flux net residual diari pel fons de la badia arriba fins al voltant de $20 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ quan funciona com a estuari positiu (Taula 1.7). Aquest flux màxim es podria explicar pel component degut a diferències de densitat (de l'ordre de $13 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de mitjana en situació de canals oberts), influït per les diferències de pressió atmosfèrica ($4.4 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) i eventualment del vent per a completar la magnitud del flux observat (fins a $12 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, sense tenir compte la fricció amb vores, picnolina i fons). No passa així amb les estimes que fan referència a la circulació en sentit contrari de l'estuari, en que l'estima de la contribució del vent podria arribar a ser extraordinàriament superior (fins $-31 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$, sense tenir en compte la fricció) a la mesurada pel correntímetre ($-5 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$). Però ja s'ha discutit prèviament que els vents de procedència WSE primer han d'aconseguir frenar la inèrcia que de per si porta circulació positiva general de la badia per poder revertir-ne el seu sentit, i aquest efecte no es té en compte en l'aproximació general de Gill. La marea baromètrica, però, podria generar per si sola aquest flux en sentit contrari ($-4.6 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$) al de la circulació estuariana positiva.

Apunt final: singularitat hídrica de la Badia dels Alfacs

Abans de concloure aquest capítol val la pena fer unes consideracions sobre un altre aspecte que pot afectar al moviment de les masses d'aigua de la badia dels Alfacs. La majoria d'estuaris mediterranis descrits a la literatura científica reben la major part dels aportos d'aigua dolça a l'hivern, com és el cas de la Badia de Tomales a Califòrnia i el sistema estuarià Peel-Harvey a la costa oest d'Austràlia Occidental (Hearn i Robson 2001), l'estuari Wilson a la costa sud del mateix continent australià (Hodgkin i Clark 1988), o l'estuari Palmiet a Sud-àfrica (Largier i Taljaard 1991). Els mesos primaverals en que comença a pujar la temperatura i encara guarden part del volum d'aigua dolça entrat en mesos anteriors, aquestes badies experimenten fenòmens intensos d'estratificació estuariana. L'estació climatològica més humida de la badia dels Alfacs no és l'hivern sinó la tardor. Paradoxalment, l'hivern resta en terme mig com a època de pluges moderades que no arriben a contrarestar la seva pròpia evaporació, donant així un balanç hídric negatiu a l'igual que passa durant la primavera i l'estiu, al menys atenent-nos al registre local de la dècada dels noranta (Taula 1.5). El patró general pot variar en anys concrets, com és el cas de 1997, en què l'hivern va ser, pel contrari, l'única estació amb balanç hídric anual positiu (+32 mm) mentre que els altres tres valors van ser a *grosso modo* -300, -200 i -10 mm, per a primavera, estiu i tardor, respectivament. Es creu que aquest règim hídric estacional pot estar associat amb el règim de pluges torrencials ocasional en altres estacions climatològiques de cada badia.

La badia dels Alfacs experimenta molts anys pluges torrencials estiuenques, i en un dels estuaris anteriors, com és l'estuari Wilson, també s'han descrit aquest tipus de precipitacions estiuenques ocasionals (Hodgkin i Clark 1988). Amb l'alta temperatura de l'aigua s'afavoreix un major desenvolupament de fenòmens hipòxics que els altres estuaris mediterranis comparables no

presenten a l'estiu, ja que els fenòmens hipòxics han estat descrits durant la primavera, després del període de pluges hivernals. Ara bé, es desconeix de forma detallada el paper complet que juguen aquestes pluges torrencials sobre la dinàmica estuària, la renovació de l'aigua eventualment hipòxica del fons, etc.

Una primera aproximació a la contribució d'aquestes pluges torrencials a la hidrografia de la badia es pot fer a partir del registre de precipitació de la dècada dels 90. Si bé poden arribar als 60 mm de balanç hídric en un dia de forma excepcional, no són rares les pluges estiuenques que deixen 20 mm dia⁻¹ de balanç net, un cop extreta l'evapotranspiració de referència (es veuran amb més detall i precisió els registres pluviomètrics en el capítol següent d'aquesta tesi). Aquests aportos nets per via atmosfèrica sobre els 50 km² la badia equivalen a prop de $1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ de forma immediata, i l'efecte d'aquestes pluges sobre la badia no s'acaba aquí, amb els efectes per precipitació directa sobre la badia, sinó que l'aigua col·lectada per la conca podria augmentar el cabal d'aigua dolça alliberat a la badia en dies o setmanes posteriors, a través de la xarxa de canals dels arrossars en interceptar aquests el flux freàtic natural a favor de gravetat de la plana deltaica, o bé, a través d'un possible vessament directe de l'aigua freàtica a la badia pel seu marge nord. El cabal mig vessat pels canals de desguàs dels arrossars per a l'època de canals oberts s'estima en $1.1 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ (Camp 1994), pel que els aportos momentanis de les pluges torrencials estiuenques suposen un increment del 100% dels aportos. A diferència dels aportos via canals de desguàs, el volum precipitat directament al mar podria suposar un increment de l'alçada de la columna d'aigua per igual a dins i fora de la badia en el cas de pluges de gran extensió, malgrat es poden donar casos de pluges locals que afectessin només una petita àrea de la badia, donat el caràcter local que tenen freqüentment les pluges mediterrànies. Per tant, no generarien la mateixa circulació estuària per gradients de densitat que generen els aportos d'aigua dels canals dels arrossars. En qualsevol cas, restaria per elaborar una anàlisi més detallada d'aquest aspecte, per saber la transcendència real d'aquestes pluges en el flux net residual a curt termini i la durada del seu possible efecte sobre el flux net residual.

Bibliografia

- Allen, R. G., *et al.*, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. *FAO technical papers. FAO irrigation and drainage paper*, 56: 301.
- Babenerd, B., 1991. Increasing oxygen deficiency in Kiel Bay (Western Baltic). A paradigm of progressing coastal eutrophication. *Meeresforsch*, 33 121-140.
- Baker, P. i Pond, S., 1995. The low-frequency residual circulation in Knight Inlet, British Columbia. *J. Phys. Oceanogr.*, 25 (5): 747-763.
- Bell, W. H., 1973. The exchange of deep water in Howe Sound Basin. *Pacific Marine Science Report*, 73 (13):
- Cameron, W. M. i Pritchard, D. W., 1965. "Estuaries", a *The Sea, II*, pp. 306-324. Wiley and Sons, New York.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Camp, J. i Delgado, M., 1987. Hidrografía de las bahías del Delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 51 (3): 351-369.
- Canicio, A. i Ibáñez, C., 1996. Evaluation of water fluxes and sediment supply. *in Impact of Climatic Change on Northwestern Mediterranean Deltas*:
- Cannon, G. A. i Ebbesmeyer, C. C., 1978. "Winter replacement of bottom water in Puget Sound", a *Estuarine Transport Processes*, 229-238. Univ. South Carolina Press, Columbia, S.C.
- Cushman-Roisin, B., 1994. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: 320.
- Dalrymple, R. W., *et al.*, 1992. Estuarine facies models-Conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 62 1130-1146.
- Davies, J. H. L., 1964. A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift fuer Geomorphologie*, 8 127-142.
- Dyer, K. R., 1997. Estuaries a physical introduction.: 195.

- Elliott, A. J., 1976. A study of the effect of meteorological forcing on the circulation in the Potomac estuary:
- Elliott, A. J., 1978. Observations of the meteorologically induced circulation in the Potomac Estuary. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 6 (3): 285-299.
- Flindt, M. R. i Kamp-Nielsen, L., 1997. Modelling of an estuarine eutrophication gradient. *Ecological Modelling*, 102 143-153.
- Fransz, H. G., *et al.*, 1991. Ecological modelling of the North Sea. *Netherlands Journal of Sea Research*, 28 (1/2): 67-140.
- Friedrichs, C. T., 2002a. Applications of Scaling in Coastal/Estuarine Physical Oceanography: 13.
- Friedrichs, C. T., 2002b. Introduction to Eutrophication, Hypoxia and Estuarine Circulation: 12.
- Gade, H. G., 1968. Horizontal and vertical exchanges and diffusion in the water masses of the Oslofjord. *Helgolander wiss. Meeresunters*, 17 462-475.
- Gázquez, A., 2002.
- Gill, A. E., 1982. Atmosphere-Ocean Dynamics. *International Geophysics Series*, 30: 662.
- Guillén, J., 1992. Dinàmica y balance sedimentario en los ambientes fluvial y litoral del Delta del Ebro. pp., Universidad Politècnica de Catalunya.
- Hagy, J. D., *et al.*, 2000. Estimation of Net Physical Transport and Hydraulic Residence Times for a Coastal Plain Estuary Using Box Models. *Estuaries*, 23 (3): 328-340.
- Hansen, V. D. i Rattray, M. J., 1965. Gravitational circulation in straits and estuaries. *J. Mar. Res.*, 23 104-122.
- Hansen, V. D. i Rattray, M. J., 1966. New dimensions in estuary classification. *Limnol. Oceanogr.*, 11 (3): 319-326.
- Hayes, M. O., 1979. "Barrier island morphology as a function of wave and tide regime", a *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*, 1-29. Academic Press, New York.
- Hearn, C. J., 1995. "Water exchange between shallow estuaries and the ocean", a *Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons.*, 151-172. CRC Press, Boca Raton, FL USA.

- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Helle, H. B., 1978. "Summer replacement of deep water in Byfjord, Western Norway: Mass exchange across the sill induced by coastal upwelling", a *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, 441-464. Elsevier, Amsterdam.
- Hodgkin, E. P. i Clark, R., 1988. Wilson, Irwin and Parry Inlets: The Estuaries of Denmark Shire., 3:
- Holbrook, J. R. i Halpern, D., 1977. Observations of near-surface currents, winds and temperature in the Strait of Juan de Fuca during November 1976-February 1977. *Trans. of the American Geophysical Union*, 53 (12): 1158 (Abstract).
- Hydrotechnic-Corporation, 1966. Estudio de reconocimiento y viabilidad del proyecto de riegos del delta del Ebro:
- Jansà i Guardiola, J. M., 1985. Manual de observación de Meteorología. Edición Facsimil, B12:
- Johannessen, O. M., 1968. Some current measurements in the Drobak Sound, the narrow entrance to the Oslofjord: 38.
- Justic, D., *et al.*, 1997. Impacts of climate change on net productivity of coastal waters: Implications for carbon budgets and hypoxia. *Climate Research*, 8 (3): 225-237.
- Katsuyuki, A. i Satoru, T., 1997. Effects of Water Movement on the Fluctuation of Oxygen Concentration in the Lower Layer of Gokasho Bay on the East Coast of Honshu Island, Japan. *Interactions Between Cultured Species and Naturally Occurring Species in the Environment. Twenty-fourth U.S.-Japan Aquaculture Panel Symposium*, 24: 85-89.
- Kester, D. R., *et al.*, 1996. Modeling, measurements, and satellite remote sensing of biologically active constituents in coastal waters. *Marine Chemistry*, 53 131-145.
- Ketchum, B. H., 1983. "Estuarine characteristics", a *Estuaries and Enclosed Seas*, 26, 1-14. Elsevier, Amsterdam.
- Kimmerer, W. J., *et al.*, 1993. A simple heuristic model of nutrient cycling in an estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 37 (2): 145-159.

- Laird, N. P., *et al.*, 1978. Winter intrusions of coastal waters into the Strait of Juan de Fuca estuary. *Trans. of the American Geophysical Union*, 59 (4): 305 (Abstract).
- Largier, J. L. i Taljaard, S., 1991. The dynamics of tidal intrusion, retention, and removal of seawater in a bar-built estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 33 (4): 325-338.
- López-Jurado, J. L., 1983. "Evaporación en el mar balear", a *Estudio oceanográfico de la plataforma continental*, 197-208. Cádiz.
- Margalef, R., 1985. The Western Mediterranean. *Key Environements*, 17: 374.
- Matsukawa, Y. i Sasaki, K., 1990. Nitrogen budget in Tokyo Bay with special reference to the low sedimentation to supply ratio. *J. Oceanogr. Soc. Japan Nihon Kaiyo Gakkai*, 46 (2): 44-54.
- Muench, R. D. i Heggie, D. T., 1978. "Deepwater exchange in Alaskan subarctic fjords", a *Estuarine transport processes*, 7, 239-267. The Belle W. Baruch Library in Marine Science,
- Munekage, Y. i Kimura, H., 1985. On the exchange of sea water in the lower layer of Uranouchi Bay by the box-model method. *Rep. USA Mar. Biol. Inst. Kochi Univ. Kochidai Kaiyoseibutsukenho*, 7 61-72.
- Norro, A. i Frankignoulle, M., 1996. Biogeochemical box modelling at small scale application to the inorganic carbon cycle in the Bay of Calvi. *Ecological Modelling*, 88 101-112.
- Officer, C. B., 1976. Physical oceanography of estuaries and associated coastal waters: 465.
- Officer, C. B., 1980. "Box model revisited", a *Estuarine and wetland processes: with emphasis on modelling*, 65-114. Plenum Press, New York.
- Officer, C. B., 1983. "Physics of estuarine circulation", a *Estuaries and enclosed seas*, 26, 15-41. Elsevier, Amsterdam.
- Penman, H. L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London*, A193 120-146.
- Percival, D. i Walden, A., 2000. Wavelet methods for time series analysis:
- Pond, S. i Pickard, G. L., 1978. Introductory dynamyc oceanography:
- Pritchard, D. W., 1952. "Estuarine hydrography", a *Advances in Geophysics*, 1, Academic, New York.

Pritchard, D. W., 1955. Estuarine circulation patterns. *Prog. Asoc. Civ. Eng.*, 81 1-11.

Proudman, J., 1953. "XI. Seiches in lakes and tides in gulfs and channels. XII. Long progressive waves. XIII. Response to tide-generating forces and to varying atmospheric pressure. XIV. Frictional effects on tides and seiches. XV. Internal Seiches, tides and waves. XVI. Waves of short period." a *Dynamical oceanography*, 219-401. Methuen & Co. Ltd., London.

Rattray, M. J. i Hansen, V. D., 1962. A similarity solution for circulation in an estuary. *J. Mar. Res.*, 20 121-133.

Rodó, X., 2001. Reversal of three global atmospheric fields linking changes in SST anomalies in the Pacific, Atlantic and Indian oceans at tropical latitudes and midlatitudes. *Climate Dynamics*, 18 (3/4): 203-207.

Rodó, X. i Rodríguez-Arias, M. A., 2002. Application of Scale Dependent Correlation (SDC) analysis to the detection of transient signals in climate series. *Climate Dynamics*, enviat

Rodríguez-Arias, M. A. i Rodó, X., 2002. A primer on the characterization of transitory dynamics in ecological series by means of the scale dependent correlation (SDC) analysis. *Oecologia*, enviat

Sánchez-Rodríguez, J., 1990. Instrumentos meteorológicos, B29:

StatSoft, I., 1999. STATISTICA for Windows (computer program manual):

Stigebrandt, A., 2001. "Fiord circulation", a *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2, 897-902. Academic Press, San Diego, USA.

Suzuki, T. i Matsukawa, Y., 1987. Hydrography and budget of dissolved total nitrogen and dissolved oxygen in the stratified season in Mikawa Bay, Japan. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 43 (1): 37-48.

Svendsen, H., 1977. A study of the circulation in a sill fjord on the west coast of Norway. *Marine Science Communications*, 3 151-209.

Svendsen, H., 1980. "Exchange processes above sill level between fjords and coastal water", a *Fjord Oceanography*, 4, 355-361. Plenum Press, New York.

Svendsen, H. i Thompson, O. R. Y., 1978. Wind driven circulation in a fjord. *J. Phys. Oceanogr.*, 8 703-712.

- Wang, D. P., 1978. Sub-tidal sea level variations in the Chesapeake Bay and relations to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 9 (2): 413-421.
- Wang, D. P. i Elliott, A. J., 1978. Non-tidal variability in the Chesapeake Bay and Potomac River: evidence for non-local forcing. *Journal of Physical Oceanography*, 8 (2): 225-232.
- Weisberg, R. H., 1976. The nontidal flow in the Province River of Narragansett Bay: a stochastic approach to estuarine circulation. *J Phys Oceanogr*, 6 (5): 721-734.

**Capítol 2. Meteorologia de la badia dels Alfacs i
característiques físico-químiques de la seva
aigua durant la dècada dels anys 90**

Capítol 2. Meteorologia de la badia dels Alfacs i característiques físico-químiques de la seva aigua durant la dècada dels anys 90

Introducció

Com hem vist en el capítol anterior, algunes variables meteorològiques condicionen en gran mesura els processos hidrodinàmics dels estuaris. A la vegada, tant aquestes variables com les característiques físico-químiques del medi aquàtic influeixen sobre els processos biològics de consum i producció d'oxigen. Pels objectius d'aquesta tesi és vital, doncs, actualitzar el coneixement sobre les característiques de l'aire i de l'aigua de la zona, tant les actuals, com esbrinant-ne els canvis recents que s'hagin pogut produir.

Entre les variables més rellevants en aquest context es troben la temperatura, la velocitat del vent, la llum incident, la transparència de l'aigua, l'estructura vertical de la columna d'aigua i l'hidrodinamisme associat i la concentració de nutrients. Sovint és molt difícil separar-los en factors aïllats atès que es troben interrelacionats i l'acció d'un d'ells afecta a alguns dels altres.

La temperatura, per exemple, afecta tant a processos purament físics com a tots els processos d'equilibri químic i al metabolisme dels organismes (Jørgensen 1994). En altres escales, la temperatura condiona els cicles estacionals de biomassa dels organismes als ecosistemes, a través de canvis en els hàbits productius, alimentaris i reproductius de molts nivells tròfics, modificant a la seva vegada la demanda biològica neta d'oxigen dins el medi aquàtic, i fins i tot, la distribució biogeogràfica dels organismes (Margalef 1974). El vent per la seva banda pot induir o modificar la circulació de les masses d'aigua (veure capítol anterior). El clima lumínic determina en gran mesura el balanç de producció/consum d'oxigen de l'ecosistema (Valiela 1995). D'altra banda, l'estructura vertical de la columna d'aigua, que condiona el funcionament hidrodinàmic (Officer 1983), ve donada per la distribució de densitats, que depèn de la temperatura i la salinitat (veure capítol anterior per més detalls). Per últim, la concentració dels principals nutrients determina, en major o menor mesura, la producció biològica (Thomann i Mueller 1987). En aquesta línia, és freqüent citar la poca disponibilitat de nitrogen o fòsfor com a factor limitant pels organismes fotosintètics en estuaris somers de climes temperats (Fisher *et al.* 1992, Morrison *et al.* 1997). Quan es dona una disponibilitat relativa molt elevada d'un d'aquests nutrients limitants, es poden produir alteracions de les comunitats per proliferacions massives d'organismes oportunistes (Duarte 1995) que, a la seva vegada, poden afectar de forma severa la dinàmica de l'oxigen.

Els canvis d'aquestes variables amb el temps, tant estacionals com al llarg d'anys diferents, també juguen un paper important en la dinàmica ecològica (Valiela 1995). Així, un any sec, té potencialment

repercussions sobre els aportats d'aigua totals rebuts a la badia, i per tant, pot afectar sensiblement als fluxos d'intercanvi net d'aigua entre mar obert i la badia (Officer 1980). A més, tendències sostingudes de canvi interanual poden conduir al sistema cap a situacions noves o induir-hi modificacions persistents. En aquest sentit, cal esmentar que Ibáñez *et al.* (1995) van descriure que havien pujat els aportats dels nutrients als ecosistemes del Delta de l'Ebre, en general, per sobre dels seus valors prèviament habituals.

L'objectiu d'aquest capítol és, doncs, subministrar una descripció de les condicions actuals de la badia d'Alfacs, tant meteorològiques com hidrogràfiques, i analitzar, en la mesura que les dades ho permetin, els possibles canvis recents en aquestes condicions. Per últim, es cercaran relacions estadístiques entre algunes de les variables analitzades que puguin ajudar a aclarir el funcionament del sistema, en quant a la dinàmica d'oxigen dissolt es refereix.

Metodologia

Orígen de les dades

Les dades en que es basa el present capítol tenen orígens força diversos, incloent projectes de recerca anteriors, sèries de dades de treballs de seguiment ambiental, registres meteorològics, i preses de mostres específiques (Taula 2.1).

Taula 2.1 Projectes d'investigació d'on procedeixen les dades que s'han analitzat en la present tesi.

Projecte d'investigació	Centre d'Investigació	Característiques dels mostrejos
CICYT (MAR89-0556) 1986-1988	Institut de Ciències del Mar (CSIC) Departament d'Ecologia (UB)	<i>Període:</i> febrer 1986 - juny 1987. <i>Freqüència de mostreig:</i> mensual (inclou cicles diaris). <i>Lloc de mostreig:</i> varis punts dels Alfacs i canals de desguàs dels arrossars. <i>Tipus de mostreig:</i> perfils en fondària.
Control de la qualitat de l'aigua de la Badia 1990-1995	Centre Nacional d'Aqüicultura (DARP)	<i>Període:</i> maig 1990 - maig 1995. <i>Freqüència de mostreig:</i> setmanal. <i>Lloc de mostreig:</i> punt central. <i>Tipus de mostreig:</i> perfils en fondària, metre a metre el 1991.
CICYT (AMB95-0171-CO2) 1995-1998	Departament d'Ecologia (UB) Institut de Ciències del Mar (CSIC)	<i>Període:</i> 1995-98 <i>Freqüència de mostreig:</i> 1995: novembre. 1996: juliol, setembre. 1997: gener, març, abril, juny, juliol, setembre, octubre. 1998: febrer, juliol, setembre. <i>Lloc de mostreig:</i> varis punts dels Alfacs i canals de desguàs dels arrossars. <i>Tipus de mostreig:</i> perfils en fondària.
Control de la qualitat de l'aigua de la Badia 1996-1998	Centre Nacional d'Aqüicultura (DARP)	<i>Període:</i> abril 1996 – maig 1998 <i>Freqüència de mostreig:</i> mensual-setmanal. <i>Lloc de mostreig:</i> punt central. <i>Tipus de mostreig:</i> perfils en fondària.

Les dades del projecte d'investigació de la CICYT de 1986-88 s'han utilitzat com a referència per analitzar si hi ha hagut algun canvi significatiu en les variables físico-químiques durant l'última dècada.

Del monitoratge del Centre Nacional d'Aqüicultura⁵ (a partir d'ara "CNA-DARP") de 1990-98 i del projecte d'investigació de la CICYT de 1995-98 (específic per als objectius d'aquesta tesi) s'han agafat les variables físico-químiques comuns dels punts de mostreig equivalents entre conjunts de dades, per tal de poder fer comparacions vàlides. Val a dir, que el fet que més o menys fossin sempre els mateixos centres o equips d'investigació els involucrats en els mostresos garanteix la seva necessària homogeneïtat.

Dades meteorològiques

Es van obtenir de l'estació automàtica situada al municipi d'Amposta (40° 42' 24" N, 00° 37' 48" E; Z=3.5m), del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya ("Amposta-DARP", veure Capítol 1). Aquestes dades en valors diaris (Taula 2.2) comprenen les temperatures extremes i mitjana, humitat mínima i mitjana (%), la velocitat del vent mitjana (m s^{-1}) i la seva orientació (graus), radiació solar global (MJ m^{-2}), precipitació total ó PPt (mm) i l'evapotranspiració de referència ó ETo (mm). Es va prendre evapotranspiració de referència com a l'estima més fiable que es disposava d'evaporació, tant a la plana deltaica com a la badia dels Alfacs (veure justificació a Capítol 1, plana 30). I es considera com a precipitació neta (o balanç hídric per via atmosfèrica) a la diferència entre PPt i ETo.

Taula 2.2 Variables meteorològiques per a la zona de la badia dels Alfacs. Dades de l'estació meteorològica del municipi d'Amposta (40° 42' 24" N, 00° 37' 48" E).

Variable (valors diaris)		Unitats
Temperatura	<i>màxima, mitjana i mínima.</i>	C
Humitat relativa	<i>mínima i mitjana</i>	%
Velocitat del vent	<i>màxima i mitjana</i>	m s^{-1}
Radiació solar global	<i>acumulada</i>	MJ m^{-2}
Intercanvi d'aigua amb l'atmosfera:		
- Precipitació total (PPt)	<i>acumulada</i>	mm (ó l m^{-2})
- Evapotranspiració de referència (ETo)	<i>acumulada</i>	mm (ó l m^{-2})
- Precipitació neta (PPt-ETo)	<i>acumulat</i>	mm (ó l m^{-2})

Variables de la columna d'aigua

Es van prendre mostres o efectuar mesures amb diferents periodicitats entre els anys 1986 i 1998 (Taula 2.1), mesurant entre altres variables la salinitat, la temperatura, l'oxigen dissolt i la irradiància

⁵ Localitzat al municipi de Sant Carles de la Ràpita (Montsià). Llavors era depenent del Departament d'Agricultura Ramaderia i Pesca (DARP) i ara de l'Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA), totes dues de la Generalitat de Catalunya.

subaquàtica *in situ*, a més de la concentració de diferents espècies químiques de carboni (dades no emprades en aquest capítol), alguns nutrients i clorofil·la a, fonamentalment (Taula 2.3).

Taula 2.3 Variables físico-químiques de l'aigua obtingudes en cada projecte emprades en aquesta tesi doctoral.

CICYT 1985-1988	CICYT 1995-1998	CNA-DARP 1990-1995	CNA-DARP 1996-1998
Temperatura (T)	T	T	T
Oxigen dissolt (OD)	OD	OD	OD
Conductivitat	Salinitat (S)	S	S
pH	Diferència de sigma-t (σ_T)	σ_T	
fosfat (PO_4)	irradiància ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
amoni (NH_4)	Carboni inorgànic dissolt (DIC)		
nitrat (NO_3)	Carboni orgànic dissolt (DOC)		
nitrit (NO_2)	POC		
Alcalinitat	PON		
Fòsfor particulat	DBO ₅ (t)		
Carboni orgànic particulat (POC)	Clorofil·la a (Cl a)	Cl a	
Nitrogen orgànic particulat (PON)	PO_4	PO_4	
Sòlids en suspensió	NH_4	NH_4	
Matèria orgànica en suspensió	NO_2	NO_2	
	NO_3	NO_3	
	Nitrogen inorgànic dissolt (DIN)		
	N/P		
	Silici (Si)		

Les dades de salinitat, temperatura i oxigen dissolt de l'aigua mesurades setmanalment entre 1995 i 1998 van ser agafades per tècnics del CNA-DARP. El lloc de mesura és l'anomenat "punt central" de la badia, i es troba situat just a la zona on s'acaben les plataformes de musclos, davant de l'esmentat centre d'investigació, a prou distància de les muscleres per evitar de resultar influït per aquestes i, alhora, arribar prop de la fondària màxima de la badia. A partir d'ara anomenarem indistintament el "punt central" com a "punt mig", equiparant-lo amb l'estació "Mig" dels nostres mostrejos (Figura 1.2a). A més es van fer altres mesures dins el mateix període d'aquestes tres variables i altres físico-químiques de l'aigua en el marc de la present tesi doctoral. Així es van efectuar perfils de salinitat i temperatura (amb un salinòmetre WTW), oxigen (amb un oxímetre WTW model oxi196 acoblat amb un sensor polarogràfic de membrana) i irradiància subaquàtica (amb una unitat d'emmagatzematge de dades LICOR LI-1000, un piranòmetre aeri LICOR 200SA, un quantòmetre pla submergible LICOR LI192SA, un quantòmetre esfèric submergible LICOR LI193SA). Les concentracions de nutrients i clorofil·la a (Cl a, també, a partir d'ara) es van determinar sobre mostres d'aigua agafades amb ampolla Niskin; les anàlisis es van dur a terme als laboratoris de l'Institut de Ciències del Mar del

Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, (ICM, CMIMA-CSIC). Les de nutrients es van congelar a -20°C fins el dia de la seva determinació, en que es van analitzar d'acord amb els mètodes descrits per Grasshoff *et al.* 1983, mitjançant la utilització d'un autoanalitzador de flux segmentat *Alliance Evolution II*. Per a la clorofil·la a es van filtrar entre 100 i 500 ml d'aigua amb filtres de microfibra de vidre (Whatman GF/F, 25mm Ø). El filtre es va guardar posteriorment en total foscor i va romandre congelat a -20°C fins el dia de la determinació. Per a determinar la concentració en pigments es va aplicar 6 ml d'acetona al 90 % al filtre congelat, es van conservar a 4°C entre 6 i 10 hores en foscor i es va centrifugar durant 15 minuts (Yentsch i Menzel 1963), per mesurar la fluorescència del líquid resultant del procés (fluoròmetre marca Turner Designs, 10-AU-450, Filtre d'excitació a 340-500 nm - pas de banda rodó 5-60 -, Filtre d'emissió >665 nm - tall esmolat rodó 2-64). Es pot trobar més informació sobre la metodologia d'anàlisi de clorofil·la a i nutrients a Olivos (2000).

Les mostres dels canals provenen dels punts de mostreig descrits a la Figura 1.4.

Tractament de les dades

Per tal d'analitzar possibles tendències en les sèries temporals de dades meteorològiques es va utilitzar regressions lineals, fetes amb el programa STATISTICA® (StatSoft 1999).

Taula 2.4 Factors de conversió entre els sensors de llum de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i els del LICOR LI-1000 manual. La calibració entre piranòmetres es va realitzar a l'estació meteorològica d'Amposta-DARP el 27/01/99, en un dia molt ventós i cobert de núvols grisos, mentre que les altres mostrades aquí es van fer en una bassa d'aigua en els camps experimentals de la Facultat de Biologia (UB) els dies 11-12/06/98, en dies clars. Totes tres regressions són estadísticament significatives ($p < 0.05$).

X	Y	equació	a	b	r^2	n
Pir. Est.	Pir. manual	$Y = a + bX$	15.155	1.2765	0.9251	13
Pir. manual	Quant. Pla	$Y = a + bX$	15.252	1.8109	0.996	57
Quant. Pla	Quant. Esf.	$Y = a(1 - e^{-bX})$	3604.4	6.266×10^{-4}	0.991	57

Pir. = piranòmetre (Watt m^{-2}); Est. = estació meteorològica; Quant. = quantòmetre ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$); Esf. = esfèric.

Les dades d'irradiància subaquàtica horàries es van obtenir aplicant factors de conversió empírics (Taula 2.4) a les mesures de radiació global de l'estació meteorològica d'Amposta, calculats a partir d'una sèrie d'intercalibracions entre els sensors (Figura 2.1). Les lectures del piranòmetre de l'estació meteorològica d'Amposta es van convertir en les del piranòmetre LICOR 200SA de l'aparell portàtil de mesures *in situ*, utilitzant un factor de conversió calculat a partir d'una sèrie de mesures simultànies fetes al propi observatori d'Amposta. Les mesures energètiques (Watt m^{-2}) es van convertir a mesures de densitat de flux fotònic ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) amb un factor de conversió derivat de mesures simultànies fetes amb el piranòmetre (LI-COR 200SA) i el quantòmetre pla (LICOR LI192SA). La densitat de flux fotònic subsuperficial es va calcular transformant les dades anteriors mitjançant l'aplicació d'un coeficient de reflexió superficial en funció de l'hora del dia i del dia de l'any (Kirk 1983) tenint en compte l'efecte del vent en la reflexió solar sobre la superfície de l'aigua (Gordon 1969, segons es cita

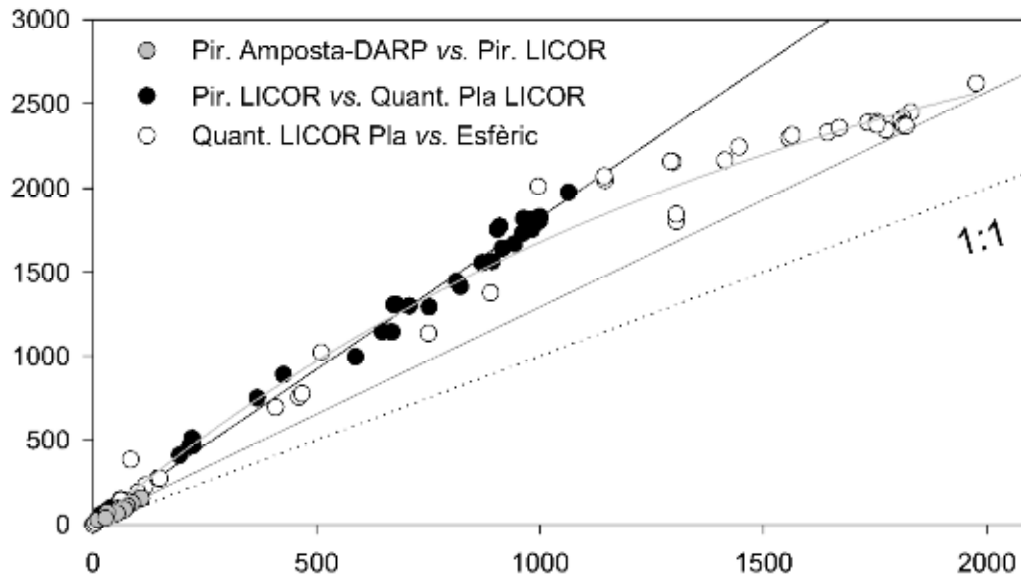


Figura 2.1 Intercalibració entre els sensors de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i els del LICOR LI1000 manual. Pir. =Piranòmetre ($W m^{-2}$); Quant.= Quantòmetre ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$). Els valors dels dos quantòmetres en la calibració són de llums aquàtiques subsuperficials. Llegendra de la figura en format "Eix X vs. Eix Y". Les respectives funcions i els seus coeficients es troben a la Taula 2.4.

a Austin 1974). I per últim, aquestes dades (que correspondrien a les mesures amb un sensor pla) es van transformar a mesures de sensor esfèric a través d'un factor de conversió derivat a partir d'una sèrie de mesures simultànies amb el quantòmetre pla (LICOR LI192SA) i el quantòmetre esfèric (LICOR LI193SA)

Les dades d'irradiància subaquàtica mesurada *in situ* amb el sensor esfèric LICOR LI193SA es van fer servir a més per estimar els coeficients d'extinció de la llum a la columna d'aigua (K_z) en diferents moments de l'any, a partir de l'assumpció d'una extinció de la llum segons una funció exponencial negativa en fondària de la forma $I_z = I_0 e^{-(K_z Z)}$ (Llei de Beer-Lambert), on " I_z " i " I_0 " són les irradiàncies a una fondària " z " i en superfície, respectivament.

El conjunt de dades de salinitat mitjana anual presenta algunes mancances (Taula 2.5). En general, però, aquestes mancances no afecten significativament a les mitjanes anuals. El registre de salinitat de l'any 90 es troba mancat dels primers 4 mesos, però la mitjana d'aquests 4 mesos ($35.4 psu \pm 0.1$, $n=28$) per tots els altres anys només és tres dècimes superior a la mitjana per tot el període 90-98 dels 8 mesos restants ($35.1 psu \pm 0.1$, $n=58$), pel que s'estima que hi ha poca diferència en la mitjana anual de 1990 pel fet de no disposar dels primers 4 mesos de dades. Si assignem als mesos dels que no es tenen dades els valors de les mitjanes d'aquests mateixos mesos per als anys en que sí es tenen dades, la salinitat mitjana anual de 1990 puja dues dècimes, restant encara per sota i a prop de 1991, l'altre any amb el que presenten les salinitats inferiors de la sèrie. I una cosa similar passa amb

1995 i 1996. Si omplim els mesos que manquen amb les mitjanes dels mesos respectius per tot el període, la salinitat mitjana de 1995 passa de 35.4 a 35.2 psu, i la de 1996 es manté en 35.3 psu, amb el que concloem que no s'altera gaire el patró d'evolució de la salinitat mitja anual entre 1990 i 1998. Per acabar, val a dir que l'any 1998 és el que es troba més minvat en quant a nombre de dades i per això és el menys creïble de tots. Pel que fa a les mitjanes mensuals, no hi ha pràcticament disparitats en el nombre de mesures entre anys diferents, si bé si que existeixen forats petits al conjunt de la sèrie de dades.

Taula 2.5 Salinitats mitjanes mensuals (psu) de la Badia dels Alfacs entre 1990 i 1998.

Mes	Any										Total
	90	91	92	93	94	95	96	97	98		
1		35,3	36,2	35,4	36,6	35,7		35,1	35,1		35,59
2		36,4	36,5	36,6	36,2	35,7		36,3	35,3		36,18
3		35,5	36,3	36,5	35,9	35,7		36,0	36,5		36,04
4		35,9	36,7	36,6	36,1	36,4	36,1	36,1			36,34
5	36,8	35,5	36,7	37,6	36,5	36,9	36,5	36,0	35,8		36,50
6	36,6	36,1	36,8	37,4	36,7		36,6	36,1			36,62
7	35,0	36,7	36,5	37,0	36,6		36,4	35,8			36,34
8	36,4	36,2	37,4	37,2	36,6		36,4	36,2			36,63
9	36,4	37,3	36,8	35,6	35,7		35,4	36,1			36,17
10	35,7	36,3	36,7	36,7	36,5		35,7	36,1			36,26
11	35,3	36,9	36,7	36,3	36,2		36,5	36,1			36,32
12	34,4	36,2	37,1	36,9	36,2		35,9	35,9			36,09
Total	36,02	36,12	36,62	36,72	36,37	35,97	36,15	35,97	35,74		36,27

S'ha assignat la fondària de la piconclina a aquell interval de fondària amb major canvi de densitat sobre perfils mesurats metre a metre. Per cada perfil, s'ha calculat la suma dels quadrats dels errors de les mitjanes de densitat de la capa superficial i de la capa fonda, i s'ha dividit aquest valor per la suma dels quadrats dels errors de la mitjana de la columna d'aigua; per cada perfil, el càlcul s'ha fet separant la capa superficial de la fonda a 1.5, 2.5, 3.5, 4.5 i 5.5, definint-se la fondària de la piconclina allà on el quocient era mínim.

Per analitzar l'evolució anual dels perfils de salinitat, temperatura, i oxigen es va realitzar una interpolació lineal per triangulació entre els valors setmanals entre 1996 i 1998 a cada fondària, de cara a poder representar les dades gràficament en forma d'isolínies. Per criteris de facilitar la referència a les dates de les quals procedeixen les mesures, s'ha inclòs la notació de dies julians en molts dels gràfics, és a dir, de dies naturals a partir del dia julià 1 definit com a tal arbitràriament, que en el nostre cas ha estat l'1 de gener de 1996, si no s'especifica el contrari.

Per tal d'analitzar possibles tendències en les sèries temporals de concentració de nutrients i clorofil·la a, s'han realitzat regressions lineals amb dades setmanals sobre tot o algunes parts del

conjunt de dades de 1990-1995, per ser el que té major densitat i extensió de dades. Per analitzar les relacions entre els nutrients i la clorofil·la a, s'han calculat correlacions de Pearson incloent també els conjunts de dades de 1986-87 i de 1996-97, malgrat contenen sèries temporals molt fraccionades (sense cicles anuals sencers) i amb menor nombre de dades; s'ha tingut en compte aquesta limitació de qualitat de dades en interpretar els resultats.

Un altre manera de buscar canvis en els nutrients accessibles als productors de la Badia dels Alfacs és analitzar les possibles diferències en el temps de les concentracions de nutrients en els aportos d'aigua dolça pels canals de desguàs dels arrossars. Amb aquesta finalitat s'ha realitzat el test no paramètric de Kolmogorov-Smirnov de comparació de les mitjanes per als dos casos de "període de mostreig" (1986-87 *versus* 1996-97). Les fonts d'entrada d'aigua dolça considerades han estat els tres canals principals de desguàs dels arrossars cap a la badia, un que abans travessa una llacuna costanera (el canal de sortida de la llacuna de l'Encanyissada) i els altres dos que vessen directament les seves aigües a la badia en sortir dels camps d'arròs (Sèquia de l'Ala i Desguàs General, veure localització a la Figura 1.4). S'ha aplicat el mateix test estadístic no paramètric per comparar la influència del fet de travessar una llacuna costanera o no en les concentracions de nutrients finals que s'aboquen a la badia.

Finalment es va realitzar una regressió lineal múltiple entre la salinitat mitjana de la badia i dues variables: la velocitat del vent i la precipitació neta, per estimar-ne la correlació parcial de cadascuna amb la salinitat tot controlant la influència de l'altre.

Respecte els nutrients i clorofil·la a del conjunt de dades entre 1990 i 1995 hem de ser cautelosos amb les conclusions sobre les tendències al llarg del període, ja que la sèrie ni tan sols arriba a la dècada. Es va excloure la concentració de fòsfor de les anàlisis paramètriques de tendències interanuals del període sencer i de la primera fase (1991-1993) per considerar exageradament anòmal el canvi de tendència general de la seva sèrie a principis de 1993, que es pensa que pot ser degut a un canvi en la metodologia emprada per la seva anàlisi a partir d'aquella data, coincidint amb el canvi de tècnic de laboratori que processava les mostres. En canvi es creu que no devia existir cap modificació substancial en la metodologia d'anàlisi de les diferents espècies de nitrogen inorgànic dissolt ni de clorofil·la a per que no s'observa cap canvi de la mateixa magnitud que el que es pot observar en les concentracions de fòsfor.

Resultats

El clima atmosfèric

El clima de la badia dels Alfacs és temperat, propi de les zones mediterrànies, amb temperatures càlides a l'estiu i suaus a l'hivern, poca precipitació, i altes evaporacions (Taula 2.6). La temperatura oscil·la entre 0 i 34 °C, presentant un cicle estacional característic (Figura 2.2a). La mínima, màxima i mitjana diària mostren un increment estadísticament significatiu (Taula 2.6) pel període considerat (1992-1999), essent la temperatura mínima diària la que presenta un augment més notori (0.27 °C a⁻¹, o un total de més de 2 °C per al vuit anys considerats).

Taula 2.6 Rang de valors de les variables climatològiques per tot el període 1992-1999 i correlació amb el temps en dies. Les dades originals procedeixen de l'observatori d'Amposta del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya.

Variable	Mitjana	Mínim	Màxim	Desv. est.	N	p<0.05	Var. = a + b * Data(dies)		
							a	b	r
Tmàx (°C)	21,0	6,2	33,9	5,34	2770	*	2.168	0.00054	0.08
Tmín (°C)	12,5	-1,1	24,3	5,68	2770	*	-13.31	0,00074	0.10
Tmit (°C)	16,6	3,9	26,9	5,39	2770	*	-5.905	0.00064	0.10
HUmin (%)	59,8	14,0	100	18,78	2744	*	-193.5	0.00723	0.31
HUmit (%)	81,7	29,0	100	14,64	2744	*	-133.6	0.00614	0.34
VVmàx (m s ⁻¹)	8,79	2,00	36,5	3,78	2790	*	-30.11	0.00111	0.23
VVmit (m s ⁻¹)	2,83	0,70	11,9	1,50	2790		0.9074	0.00005	0.03
RG (MJ m ⁻²)	15,4	0,4	30,2	9,32	2790	*	-14.64	0.00085	0.07
PPT (l m ⁻²)	1,16	0	104,6	5,13	2790		-2.280	0.00010	0.02
ETo (l m ⁻²)	4,23	0	9,0	10,79	2790	*	6.793	-0.00013	-0.05
PPT-ETO (l m ⁻²)	-1,88	-9,00	103,3	5,84	2756		-9.073	0.00021	0.03

Tmàx, Tmín i Tmit: temperatura màxima, mínima i mitjana respectivament. HUmin i HUmit: Humitat mínima i mitjana respectivament. VVmàx, VVmit, DV: Velocitat màxima, mitjana i Direcció del vent. RG, RN: Radiació global i neta respectivament. PPT: Precipitació total acumulada. ETo: Evapotranspiració De referència. PPT-ETO: aportos nets d'aigua dolça via atmosfèrica (Precipitació Total - Evapotranspiració de referència). Respecte les irradiàncies o radiacions solars, la global (RG) indica la quantitat de calor que arriba al terra i la neta (RN) es defineix com la radiació solar absorbida realment pel sòl i és el resultat de restar la radiació emesa pel terra de la incident del Sol. Les seves unitats són MegaJoules per metre quadrat en els resums diaris de l'observatori, però en Watt m⁻² en els mateixos registres però de tipus horari. r = coeficient de correlació. Les regressions lineals estadísticament significatives (p<0.05) s'han marcat amb un asterisc en la columna corresponent.

La humitat relativa es troba entre el 30% i el 100% (mitjanes diàries, Figura 2.2b). També presenta un augment significatiu al llarg dels 8 anys (2.63 % a⁻¹ per la mínima i 2.24 % a⁻¹ per la mitjana).

La velocitat mitjana diària del vent generalment es troba per sota dels 5 m s⁻¹ (Figura 2.2c), podent arribar a valors màxims horaris de fins a 36.5 m s⁻¹. Aquestes màximes s'han incrementat en 0.4 m s⁻¹ any⁻¹, ó el que és el mateix, 3.2 m s⁻¹ pels vuit anys considerats, mentre que la velocitat mitjana no ha mostrat tendències de canvi significatives. La direcció predominant del vent (Figura 2.3) és NW

(Mestral), especialment a l'hivern i a la tardor, mentre que a l'estiu i, sobre tot, a la primavera, hi han molt dies en que el vent bufa de SE a SW (Xaloc, Migjorn o Garbí).

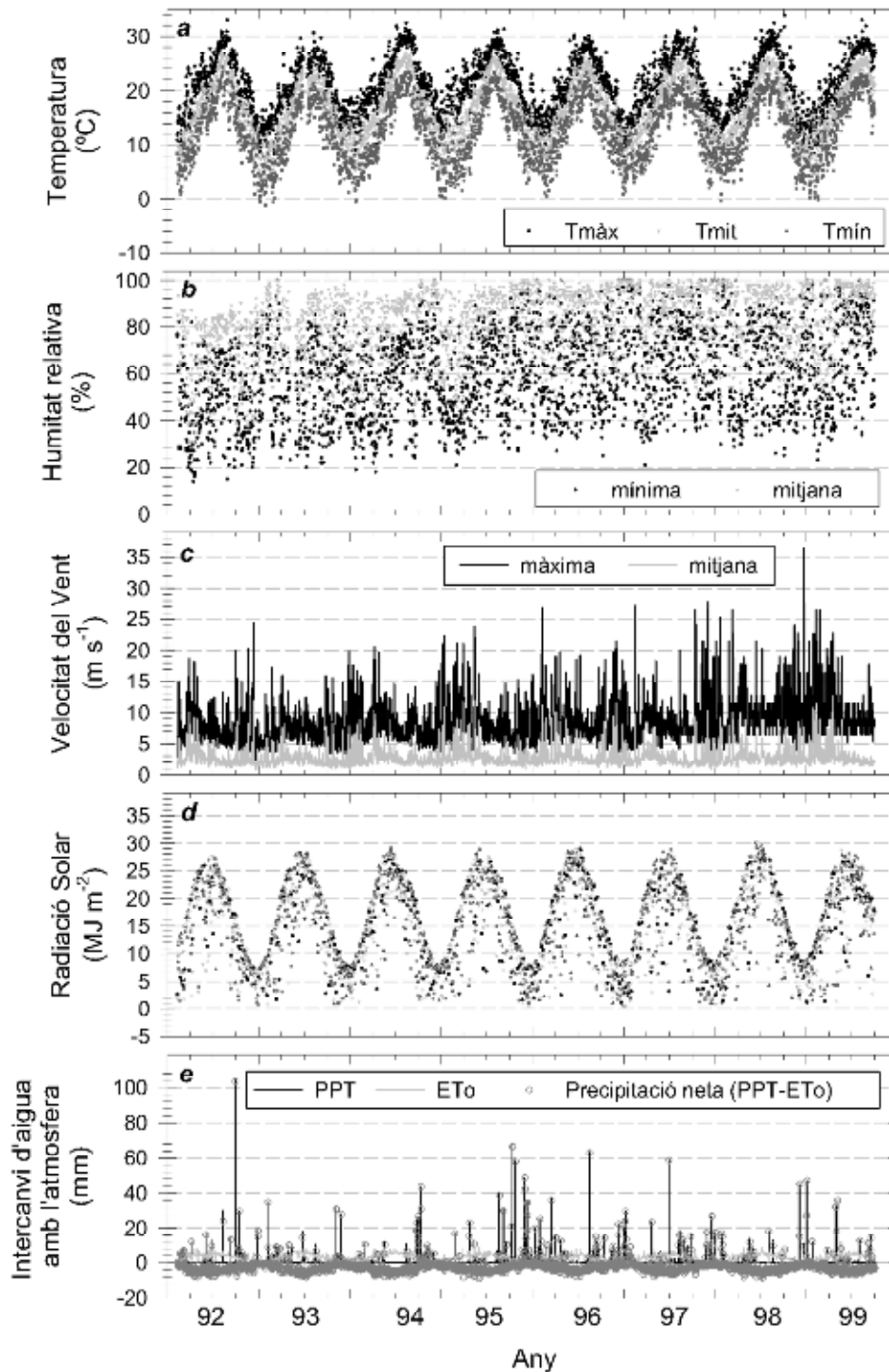


Figura 2.2 Climatologia dels Alfacs entre 1992 i 1999. (a) Temperatura (màxima, mitjana i mínima, en °C), (b) Humitat relativa (mínima i mitjana, en %), (c) Velocitat del vent (màxima i mitjana, en m s^{-1}), (d) Radiació Solar (global i neta, en MJ m^{-2}), (e) intercanvi d'aigua amb l'atmosfera (Precipitació Total-PPT, Evapotranspiració de referència-ETo, i balanç hídric net o precipitació neta, mesura com PPT-ETo; totes tres en mm ó l m^{-2}). Les dades procedeixen de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i corresponen a mitjanes diàries, excepte les de precipitació i evaporació, que corresponen a valors acumulats diaris.

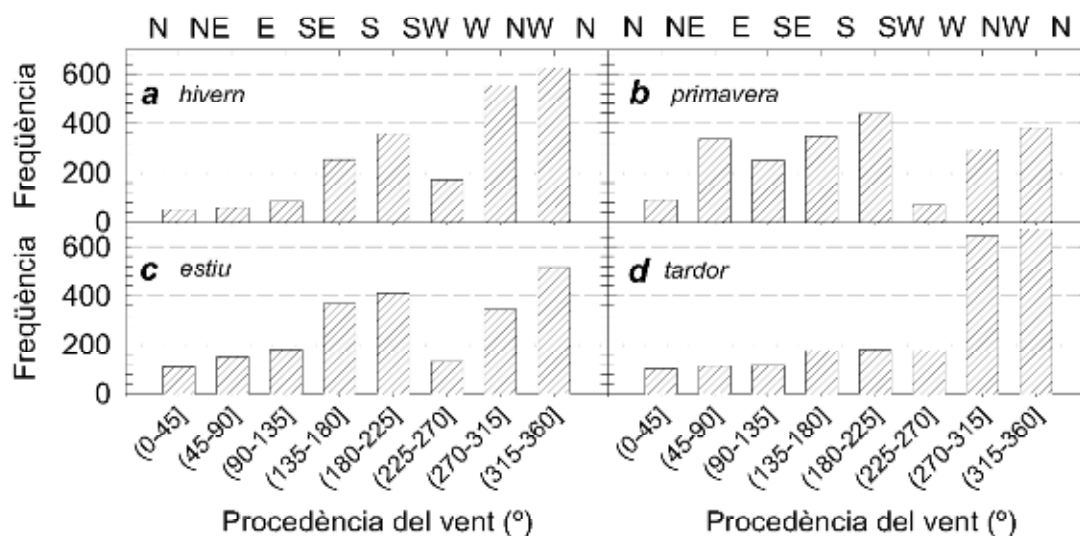


Figura 2.3 Distribució de freqüències de l'orientació del vent. Valors horaris de 1997 de l'estació meteorològica d'Ampostà (n=8759): (a) hivern, (b) primavera, (c) estiu, (d) tardor.

La radiació solar incident (Figura 2.2d) oscil·la entre valors inferiors a 1 i els 30 MJ m⁻² dia⁻¹, el que equival aproximadament a uns màxims diaris de radiació instantània de 830W m⁻² a l'estiu i 220 W m⁻² a l'hivern. La radiació solar mostra un increment significatiu de l'ordre de 0.00085 MJ m⁻² dia⁻², (de l'ordre d'un 0.006% d'increment, que equival a 0.31 MJ m⁻² més cada any) malgrat la seva correlació amb el temps és molt baixa a causa de l'elevada variabilitat en la radiació incident (r=0.07).

La precipitació total (PPT) acumulada diària ronda, per terme mig, el mil·límetre ó litre per metre quadrat, si bé la distribució és força irregular, amb més precipitació en general en els mesos de tardor (la màxima, veure capítol anterior) i hivern, amb d'algunes pluges torrencials a primavera o estiu també. L'evapotranspiració de referència (ET₀) segueix un cicle similar al de la temperatura, i, juntament amb la precipitació, genera un intercanvi d'aigua amb l'atmosfera (precipitació neta, PPT-ET₀) que significa guanys nets per a la badia els dies de pluja generalment iguals o superiors als 5 l m⁻² (Figura 2.2e). Ara bé, la resta del temps, el balanç net és favorable a l'evaporació, i en mitjanes diàries per a tot el període 1992-1999, s'evapora unes quatre vegades més quantitat d'aigua que la que precipita (pèrdues en el balanç net, o "precipitació neta" negativa, segons la variable representada a la figura).

Irradiància subaquàtica

El coeficient d'extinció de la llum a la columna d'aigua oscil·la aproximadament entre 0.3 m⁻¹ a l'abril i 0.6 m⁻¹ a finals de setembre de 1997 (Figura 2.4). Això provoca que la llum al fons estigui generalment compresa entre 100 i 1000 μmol m⁻² s⁻¹ (Figura 2.5), el que representa entre un 5 i un 20% de la irradiància subsuperficial.

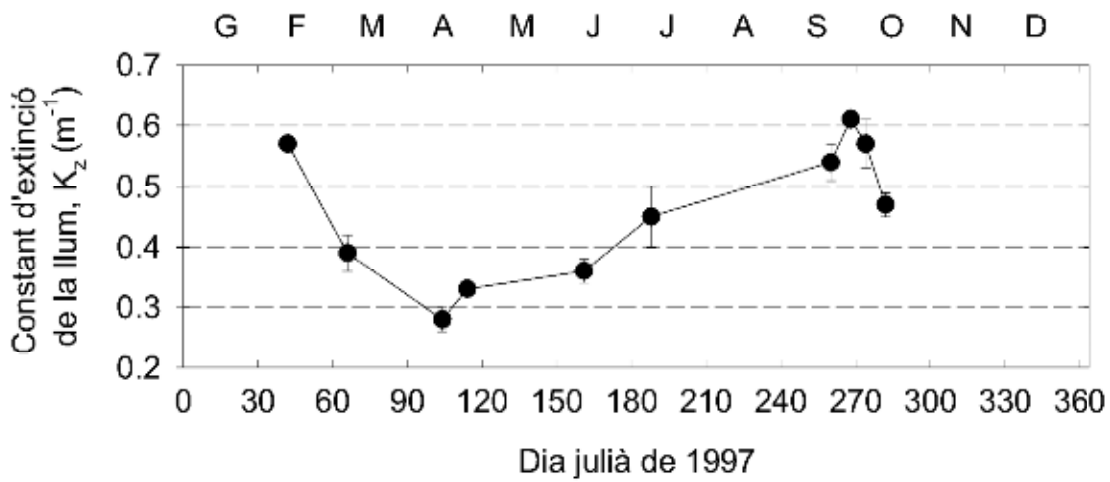


Figura 2.4 Coeficient d'extinció de la llum (k_z) mesurat *in situ* a la columna d'aigua (m^{-1}).

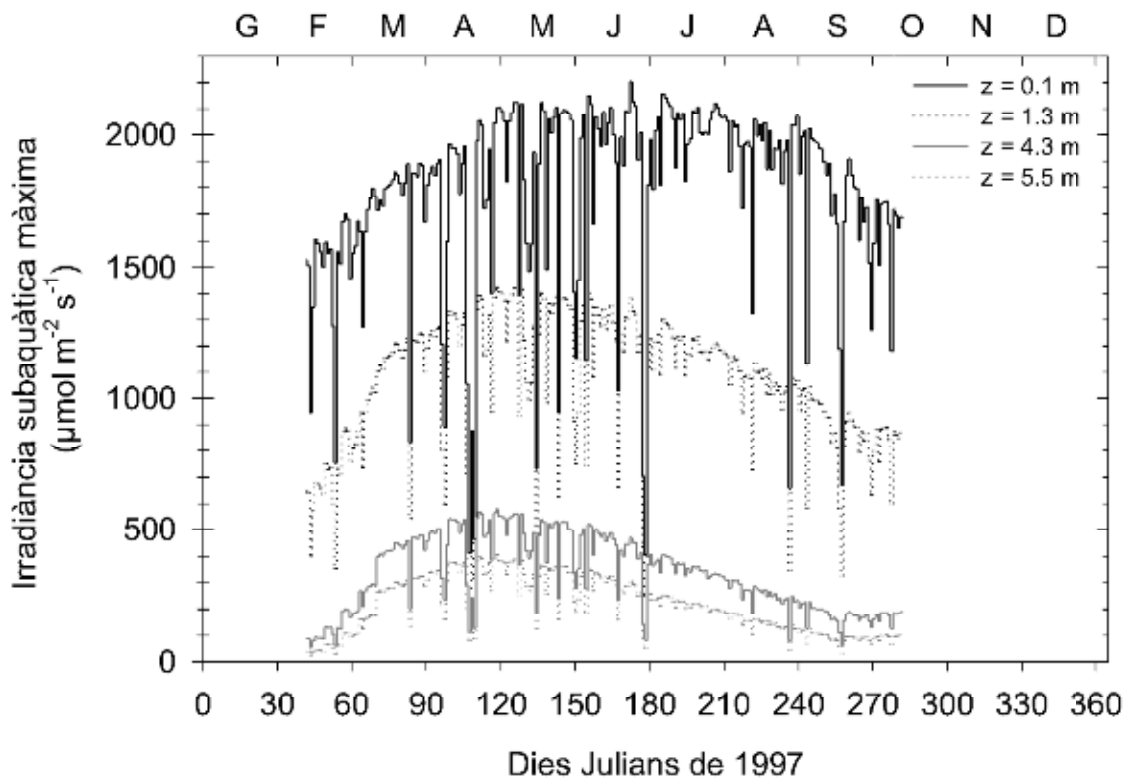


Figura 2.5 Irradiància subaquàtica calculada a diverses fondàries de la columna d'aigua a partir de l'extinció exponencial negativa amb el coeficient k_z .

Salinitat, temperatura, oxigen i relacions amb altres variables

Existeix un gradient marcat de salinitat en fondària, amb la piconclina (haloclina) situada generalment prop dels 3 m (Figura 2.6). Les diferències de salinitat entre la capa inferior i la capa superior solen estar entre 2 i 4 psu la major part de les vegades (Figura 2.7), existint situacions esporàdiques de barreja, de molt curta durada i que aviat evolucionen cap a la re-estratificació.

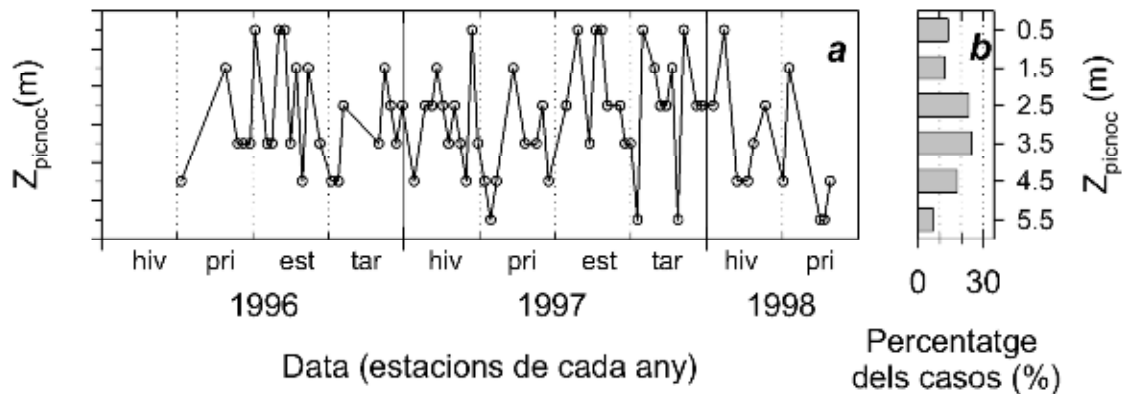


Figura 2.6 Fondària de la piconclina a la badia dels Alfacs: (a) valors discrets per cada moment de mostreig, (b) histograma de freqüències de l'aparició de cada fondària. Les dades corresponen al període 1996 i 1998 (CNA-DARP).

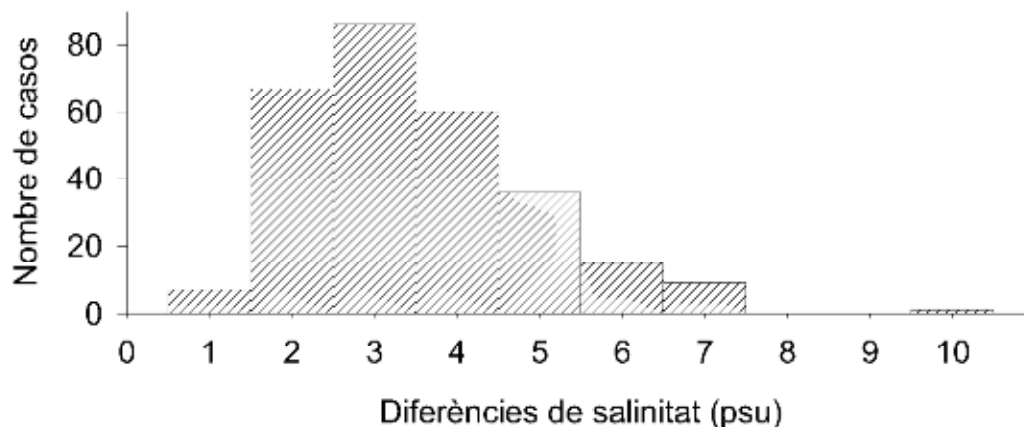


Figura 2.7 Diferències de salinitat (psu) entre la capa inferior i la capa superficial del punt central de la Badia dels Alfacs. Dades setmanals de 1990-1998 (n=280).

La salinitat es mou entre 30 i 36 psu aproximadament per sobre de l'haloclina (capa superficial, de 0 a 3 m), mentre que la capa profunda (de 3 a 6-6.5 m) presenta valors entre 34 i 38 psu (Figura 2.8a). La temperatura de l'aigua oscil·la entre prop dels 8 °C i prop dels 30 °C (Figura 2.8b), amb diferències petites sobre l'eix vertical. L'oxigen dissolt per altra banda es troba en la capa superficial entre els 6 i els 11 mg O₂ l⁻¹ generalment, i en la capa profunda entre els 3 i els 10 mg O₂ l⁻¹, si bé alguns anys s'han manifestat valors per sota del límit de la hipòxia (3 mg O₂ l⁻¹), com ha succeït a tardor 1992-hivern 1993 i de forma molt més pronunciada el 1994 (Figura 2.8c).

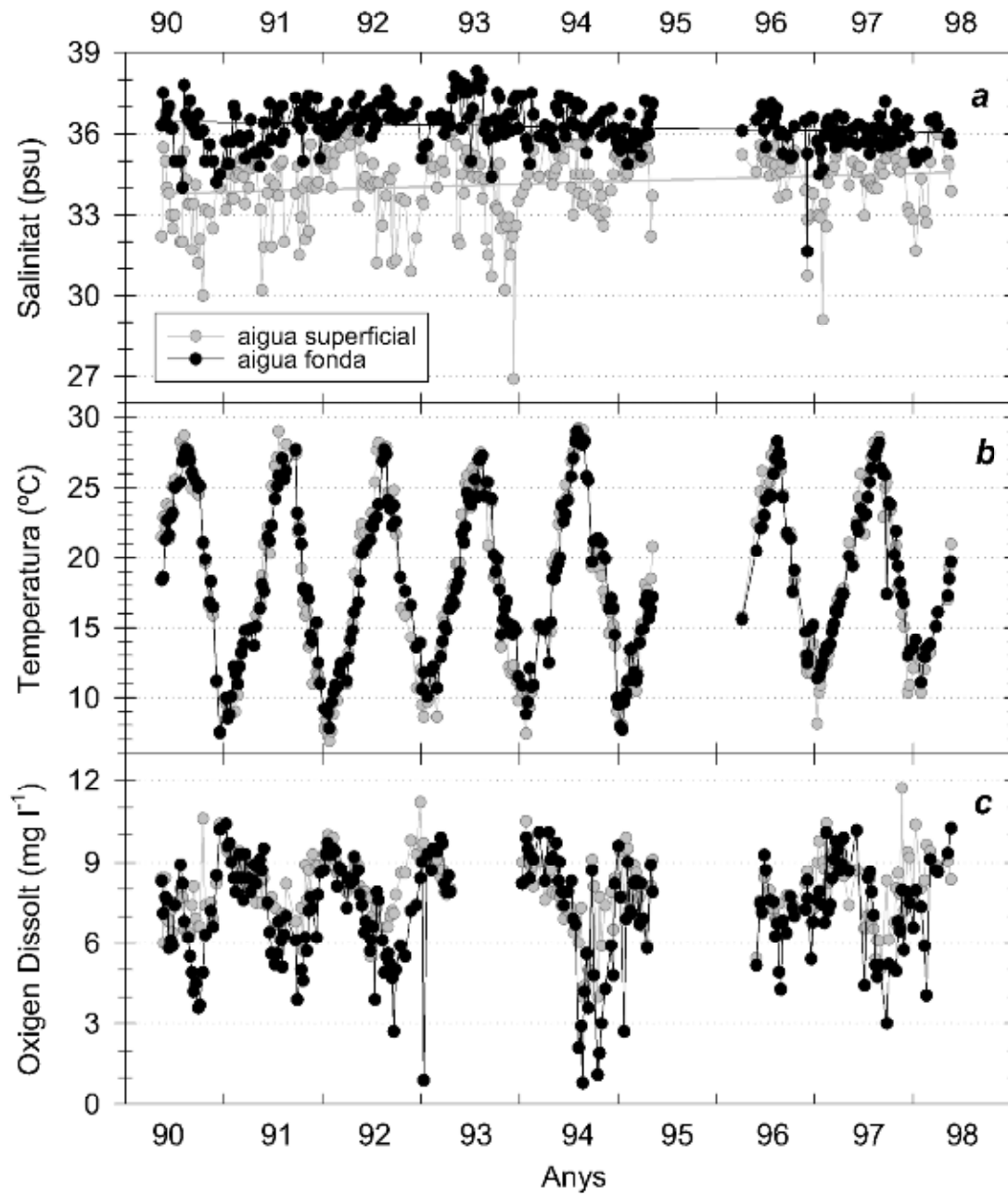


Figura 2.8 Sèries temporals de (a) salinitat (psu), (b) temperatura (°C) i (c) oxigen dissolt (mg l⁻¹), corresponents a l'aigua superficial (sèrie clara) i fonda (sèrie fosca) del punt mig de la Badia dels Alfacs, entre 1990 i 1998. Les línies contínues representen les tendències significatives al llarg del temps (per la salinitat superficial, $S=33.7+ 2.72 \cdot 10^{-4} T$, $p<0.01$, T en dies, i per la profunda, $S=36.5 - 1.37 \cdot 10^{-4} T$, $p<0.05$).

La diferència de salinitat entre la capa de fons i la capa superficial es troba correlacionada amb la velocitat del vent (Figura 2.9, $r=0.46$, $p<0.001$, $n=61$). La velocitat mitjana mensual necessària per barrejar totalment la columna d'aigua (estimada a partir del punt de tall de la recta de regressió $Y=4.58-0.89X$ en l'eix de les abscisses) es troba als 5.15 m s^{-1} . Aquesta velocitat "llindar" correspon a vents teòrics, que no s'han observat mai en el camp durant el període estudiat.

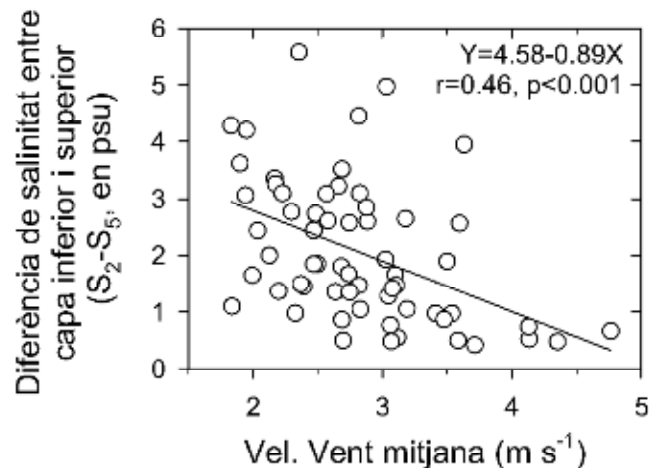


Figura 2.9 Efecte de la velocitat del vent (m s^{-1}) sobre l'estratificació de la columna d'aigua, representada per la diferència de salinitat mitjana entre la capa de fons (S_2 , en psu) i la de superfície (S_5). Les dades són mitjanes mensuals del període 1992-1997 ($n=61$). La intersecció de la recta de regressió amb l'eix horitzontal és a $x=5.15 \text{ m s}^{-1}$, i indica la velocitat del vent estimada a la qual es perdria totalment l'estratificació.

La Salinitat i la concentració d'oxigen dissolt mostren una variació estacional que pot ser no és gaire aparent a la Figura 2.8, però que es fa palesa en treballar amb mitjanes mensuals (Figura 2.10). Abril és el mes més càlid en que els canals es troben tancats i per tant presenta la salinitat mitjana de les dues capes més alta de tot l'any; a partir de quan arriba l'aigua de rec i desguàs dels arrossars pels canals d'entrada a la badia i la salinitat disminueix progressivament fins a setembre-octubre, en que es tornen a tancar els canals (Figura 2.10a). Aquesta salinitat mitjana de les dues capes, a la vegada, es veu influïda per la precipitació neta (Figura 2.10b) i les seves variacions al llarg de l'any són en general oposades. El pic de màxim dèficit hídric (150 mm) es situa al juliol, amb molt poca variància entre els diferents anys; el majors guanys nets d'aigua es mostren el mes de desembre (35 l m^{-2}). La velocitat del vent presenta un màxim anual destacable a l'abril, amb valors diaris mitjans de 3.8 m s^{-1} i màxims de 10.5 m s^{-1} (Figura 2.10c, d). L'oxigen dissolt mitjà de la columna d'aigua manifesta valors propers als $8\text{-}9 \text{ mg l}^{-1}$ durant els primers 5 mesos de l'any, durant juny i juliol baixa als 7 mg l^{-1} , i a l'agost mostra el valor mínim de l'any, a prop dels 6 mg l^{-1} que manté durant 3 mesos. No és fins a partir de desembre en que es mostra una recuperació (Figura 2.10e). Per capes s'observa que en general la capa inferior té menor concentració d'oxigen que la superior excepte en abril i maig en que la mitjana dels valors de la capa fonda és més alta que els de la capa superior (Figura 2.10f). Les majors diferències entre la concentració de les dues capes es troben en agost, setembre i octubre.

Per al període entre mitjans de 1996 i principis de 1998 per al qual es disposen de perfils en fondària, la salinitat setmanal mitjana de les dues capes oscil·la entre valors poc per sobre dels 36 psu entre març i abril, i valors al voltant dels 34 psu al desembre-gener-febren (Figura 2.11a). La precipitació neta (PPT - ETo) en general mostra un balanç negatiu de menys d'una desena de l m^{-2} , excepte en ocasions estivals puntuals en que es poden donar pluges torrencials característiques del clima mediterrani que ocasionen un superàvit d'entre una desena de l m^{-2} i prop dels 60 l m^{-2} (Figura 2.11b).

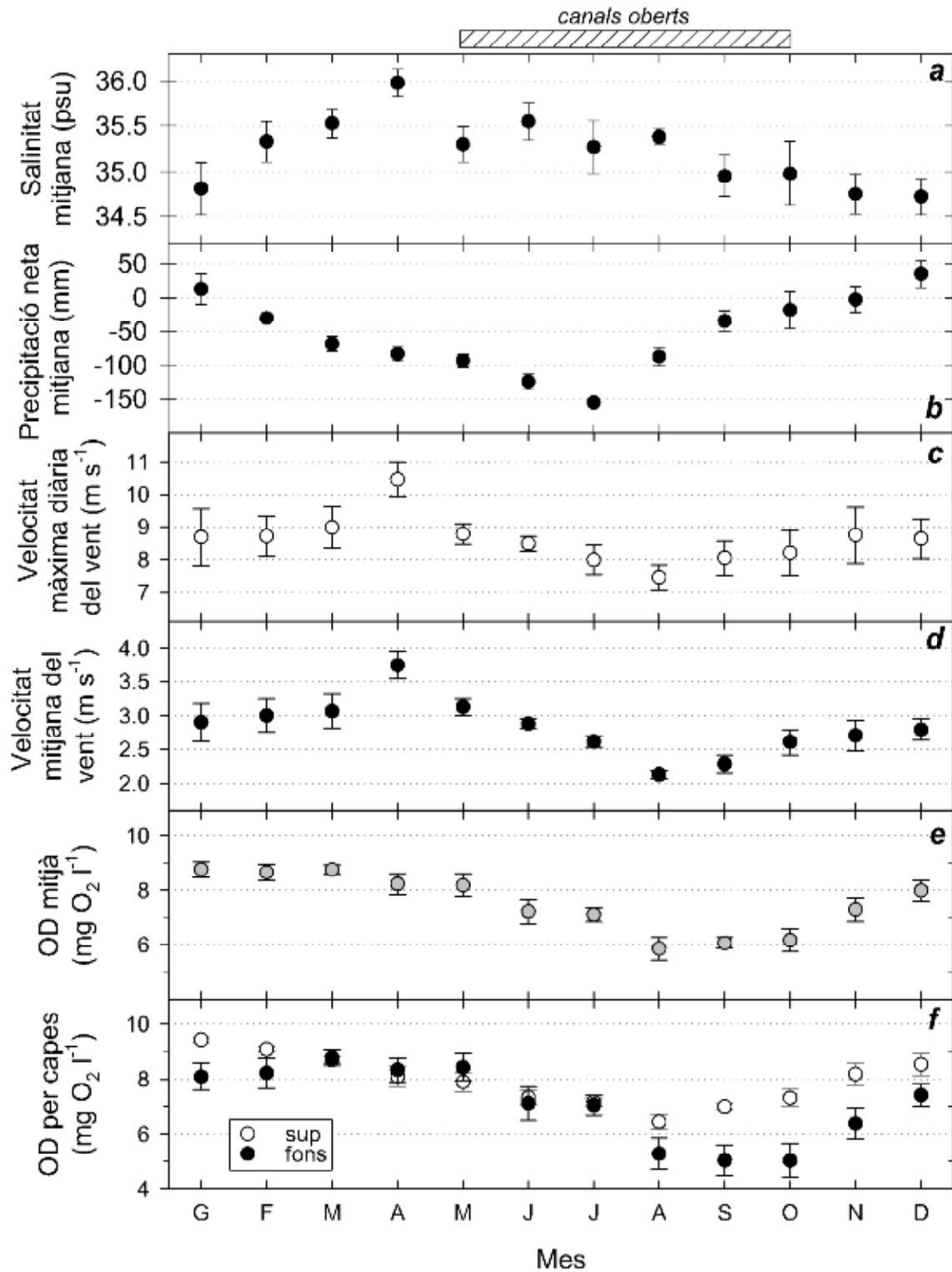


Figura 2.10 Evolució mensual mitjana durant la dècada dels 90 de: (a) salinitat (psu), (b) PPT-ETo acumulada (mm ó l m⁻²), (c) velocitat màxima diària del vent (m s⁻¹), (d) velocitat mitjana del vent (m s⁻¹), (e) oxigen dissolt de tota la columna d'aigua (mg l⁻¹), (f) oxigen dissolt per capes, superficial de color blanc, fonda de color negre.

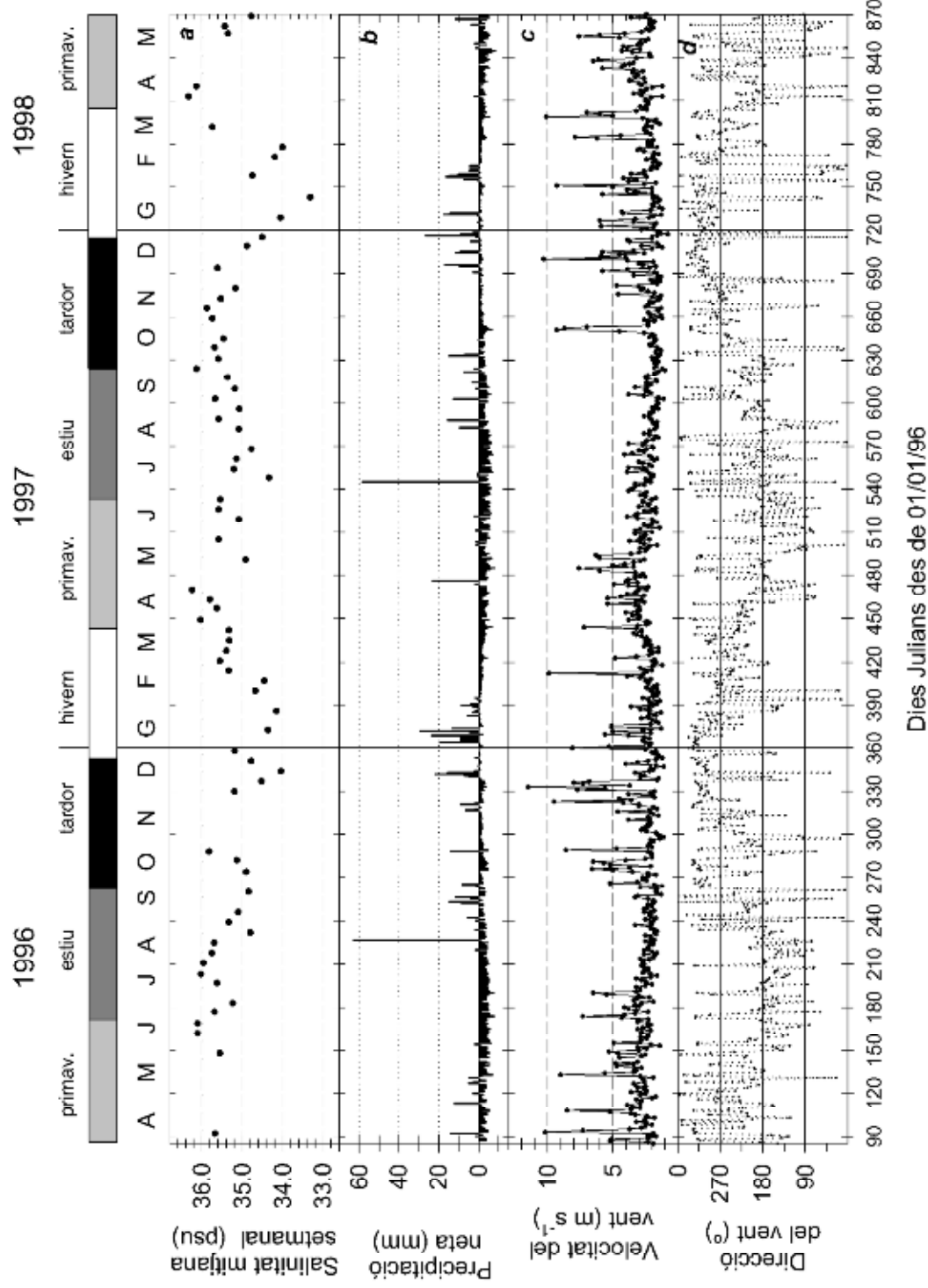


Figura 2.11 Evolucions de: (a) salinitat mitjana setmanal per tota la columna d'aigua (psu), (b) PPT-ETo acumulada diària (mm), (c) velocitat del vent mitjana diària ($m s^{-1}$), (d) orientació del vent mitjana diària ($^{\circ}$), durant el període de 1996-98.

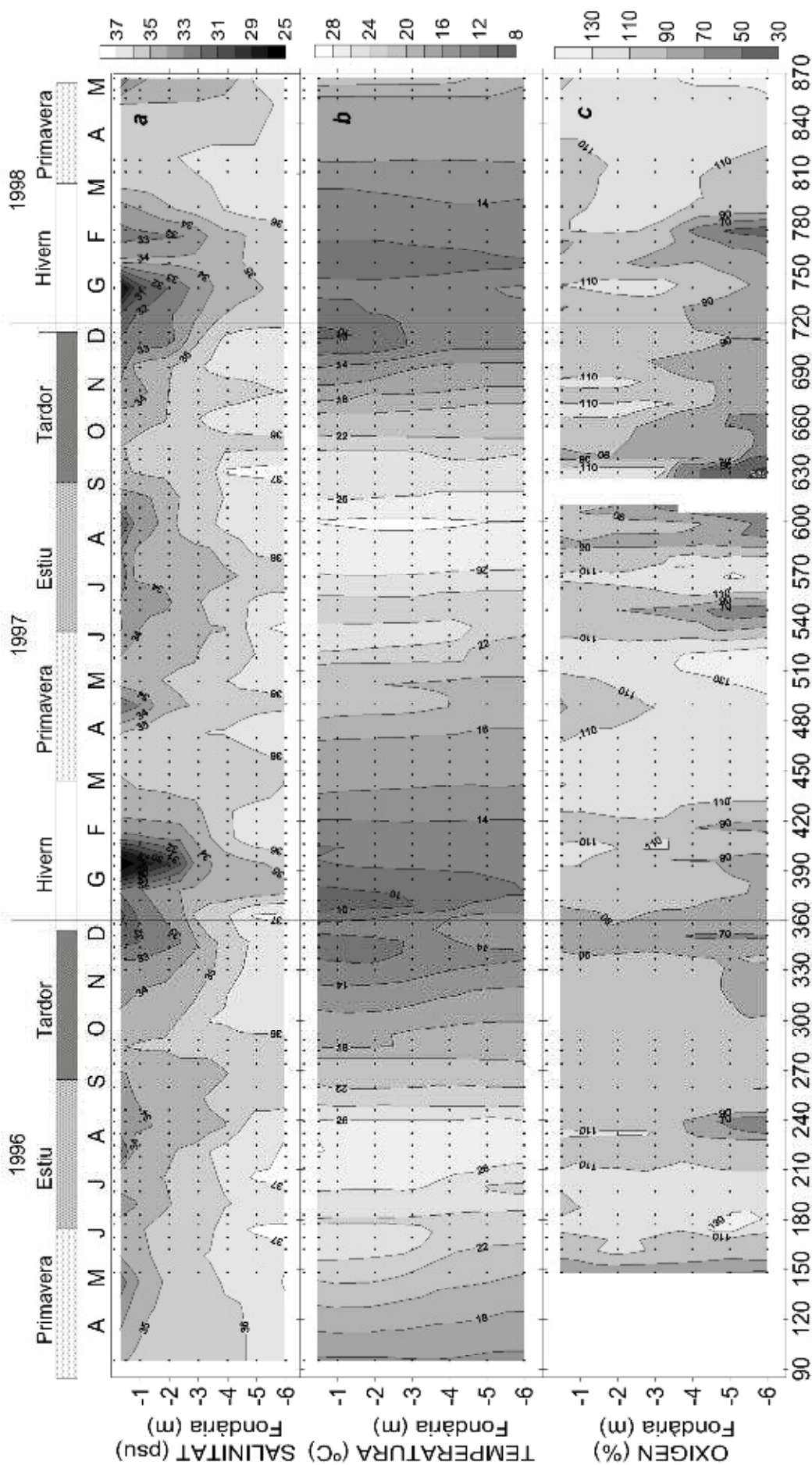


Figura 2.12 Evolució de (a) salinitat (psu), (b) temperatura (°C) i (c) oxigen dissolt (% de saturació) del punt mig de la Badia dels Alfacs (1996-98).

El vent va bufar amb una velocitat instantània d'entre 0.5 m s^{-1} i els 4 m s^{-1} prop del 75 % del temps, aproximadament (en aquest cas calculat per a tot l'any 1997 com a exemple d'any sencer). Les velocitats mitjanes diàries del període 96-98 van ser superiors a la unitat i properes als 4 m s^{-1} , arribant en ocasions de tardor i hivern a posar-se al voltant dels 10 m s^{-1} (Figura 2.11c). La pràctica totalitat de vents superiors als 5 m s^{-1} són de Mestral (quart quadrant, i.e., entre 270 i 360°), com es pot observar al gràfic de procedència mitjana diària del vent (Figura 2.11d).

La distribució vertical de la salinitat mostra gradients de salinitat en fondària, amb una capa de mes de 36 psu al fons de la badia que desapareix durant períodes que van entre les dues i cinc setmanes, aproximadament (Figura 2.12a). L'estratificació salina només es trenca totalment en situacions molt puntuals (com durant la segona quinzena de març de 1997). Les diferències de temperatura entre superfície i fons solen ser inferiors a $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$; això fa que aquesta variació no es vegi reflectida en un gràfic d'isotermes cada $2 \text{ }^\circ\text{C}$ malgrat ser-hi present (Figura 2.12b) i només ressalten les diferències de major intensitat. L'oxigen manifesta una pauta de variació més complexa (Figura 2.12c), amb algunes pujades per sobre de saturació en situacions concretes com les de finals de primavera (del 18 al 28 de juny per 1996, del 4 de maig al 3 de juny per 1997, a partir de principis de maig per 1998), davallades en fondària durant l'estiu (del 7 al 27 d'agost per 1996, del 23 de juny al 13 de juliol i a partir del dia 11 de setembre i fins finals de mes per 1997) i algunes altres davallades excepcionals en situacions hivernals (del 29 de gener al 18 de febrer, per 1998).

Al llarg de tot el període del que es disposen dades, la salinitat s'incrementa lleugerament en la capa superficial i disminueix lleugerament en la capa profunda (Taula 2.7). No es veu cap tendència clara en la temperatura de l'aigua de la Badia en analitzar el conjunt de dades disponible (Taula 2.8) però, en canvi, si s'analitza específicament l'evolució de la temperatura mínima anual de la capa fonda, es pot observar com l'augment ha estat estadísticament significatiu i notable, de l'ordre de mig grau per any ($p < 0.05$, Figura 2.13).

Taula 2.7 Regressions lineals de les salinitats (en psu) de la capa superficial i profunda respecte el temps (en dies), a partir de les dades mostrades en la Taula 2.5.

$S = a + bT$			
Capa	a	b	p
Superficial	33.7	2.72×10^{-4}	**
Profunda	36.5	-1.37×10^{-1}	*

(* = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$)

D'altra banda, existeix una bona correlació entre la temperatura mínima aèria de la zona del Delta de l'Ebre i la temperatura de l'aigua a 6 m de fondària a la badia dels Alfacs ($r^2 = 0.77$, $n = 171$, $p < 0.001$, Figura 2.14) sense manifestar cap decalatge temporal entre les dues sèries

(dades no mostrades). A partir de la tendència observada a augmentar la temperatura mínima aèria diària es pot inferir que la temperatura de l'aigua a 6 metres de fondària ha augmentat (Taula 2.9), estimant-se un increment de 0.2 °C per any, quasi 2 °C pel període estudiat.

Taula 2.8 Temperatures mínimes mensuals i anuals (°C) de l'aigua de la capa fonda de la badia dels Alfacs entre 1990 i 1998.

Mes	Any										Total
	90	91	92	93	94	95	96	97	98		
1		8.5	7.8	10.1	8.8	7.7		11.4	11.1	7.7	
2		11	9.7	11.9	9.7	11.2		13.2	12.9	9.7	
3		13.2	11.8	10.7	15.2	11.2		14.7	13.8	10.7	
4		13.7	11.2	14.8	12.5	14.9	15.6	16.7		11.2	
5	18.4	15.1	16.8	16.7	18.5	16.3	20.5	19.4	17.3	15.1	
6	21.6	21.2	20.8	21.1	22.6		22.1	21.9		20.8	
7	25	24.2	22.2	23.8	25.8		24.1	23		22.2	
8	26.9	25.6	26.9	24.4	28.1		26.7	27.3		24.4	
9	25	27.7	22.3	20.2	19.7		21.8	17.4		17.4	
10	19.9	17.6	18.6	14.5	21.2		17.6	20.2		14.5	
11	16.5	14	16.6	14.9	16.4		14.7	16.8		14	
12	7.5	11	13.6	11.5	10		12.5	13		7.5	
Total	7.5	8.5	7.8	10.1	8.8	7.7	12.5	11.4	11.1	7.5	

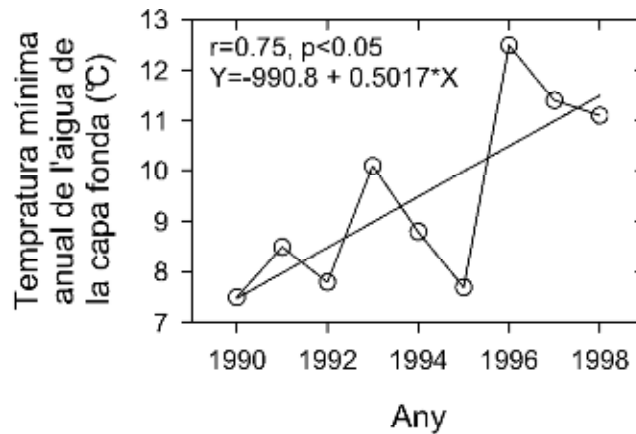


Figura 2.13 Evolució de la temperatura mínima (°C) de l'aigua de la capa fonda al llarg de la dècada dels anys 90.

Taula 2.9 Incrementos estimats de la temperatura (C) de l'aigua més fonda de la badia dels Alfacs (a 6m de fondària, en contacte amb la comunitat bentònica de l'ecosistema). Calculat a partir de la tendència d'increment de la temperatura mínima diària de l'aire (Taula 2.6) i de la correlació entre la aquesta i la temperatura de l'aigua de 6m de fondària (Figura 2.14).

Temps			Increment de temperatura de l'aigua de 6m de fondària
<i>anys</i>	<i>mesos</i>	<i>dies</i>	C
0	0.0	1	0.0006
0	0.3	10	0.0061
0	3.3	100	0.0612
1	12	360	0.2203
5	60	1800	1.1013
10	120	3600	2.2026

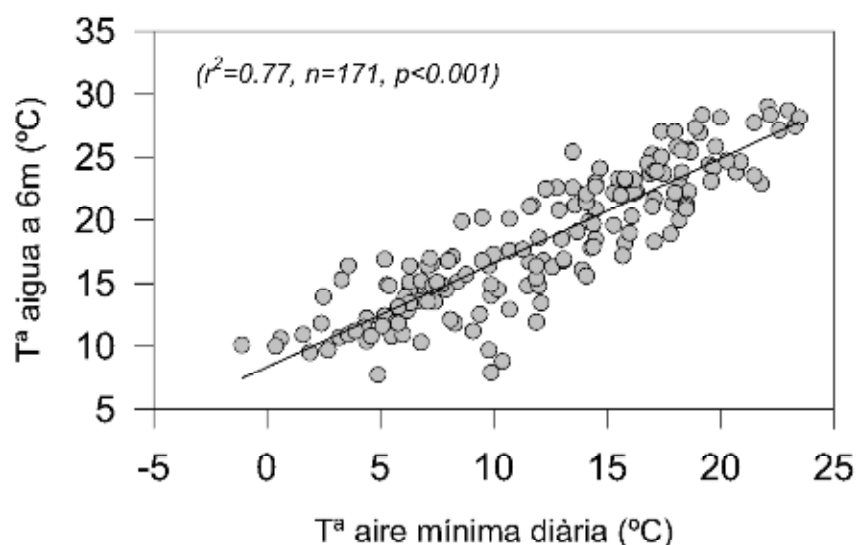


Figura 2.14 Relació entre temperatura mínima diària de l'aire i la temperatura de l'aigua de fons del punt central. Dades aparellades de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i dels diversos programes de recerca de qualitat de l'aigua a la Badia dels Alfacs, durant el període 1992-1998. La regressió lineal és estadísticament significativa .

En la sèrie temporal de dades de concentració de l'oxigen no es veu cap tendència significativa. La distribució de freqüències de classes de valors any per any faria sospitar una possible disminució de la moda d' $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ en els darrers anys (Figura 2.15, entre 8 i 9 mg l^{-1} a 1991, 1992 i 1994; i entre 7 i 8 mg l^{-1} a 1997). Aquesta tendència, però, no és estadísticament significativa, i per tant s'accepta la hipòtesi que l'oxigen dissolt no ha disminuït.

Els anys amb major salinitat van ser 1992 i 1994 (Figura 2.16a) que coincideix amb què van ser, alhora, els dos anys més secs (Figura 2.16b).

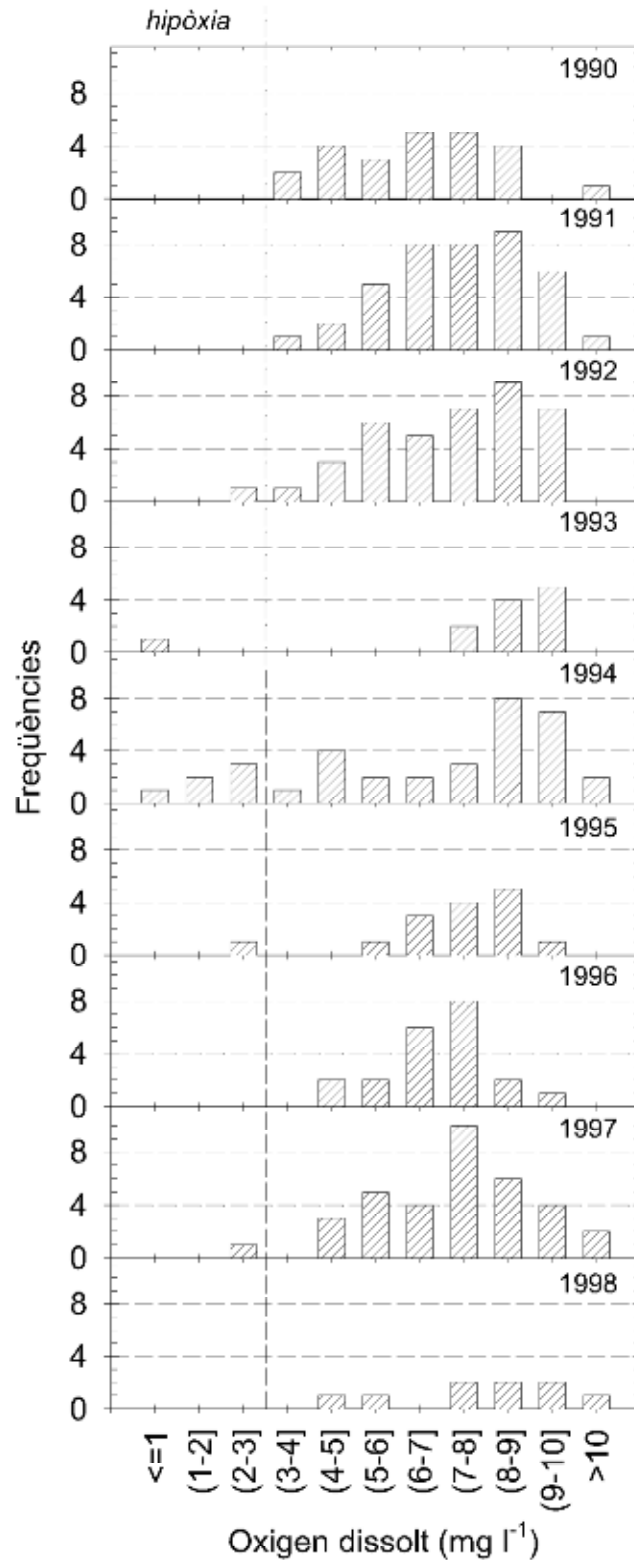


Figura 2.15 Distribució de concentracions d'oxigen dissolt a la capa profunda del punt central de la badia dels Alfacs. Dades setmanals entre 1990 i 1998 (n. anuals=12-38). A l'esquerra de la línia vertical queden els valors corresponents a situacions d'hipòxia.

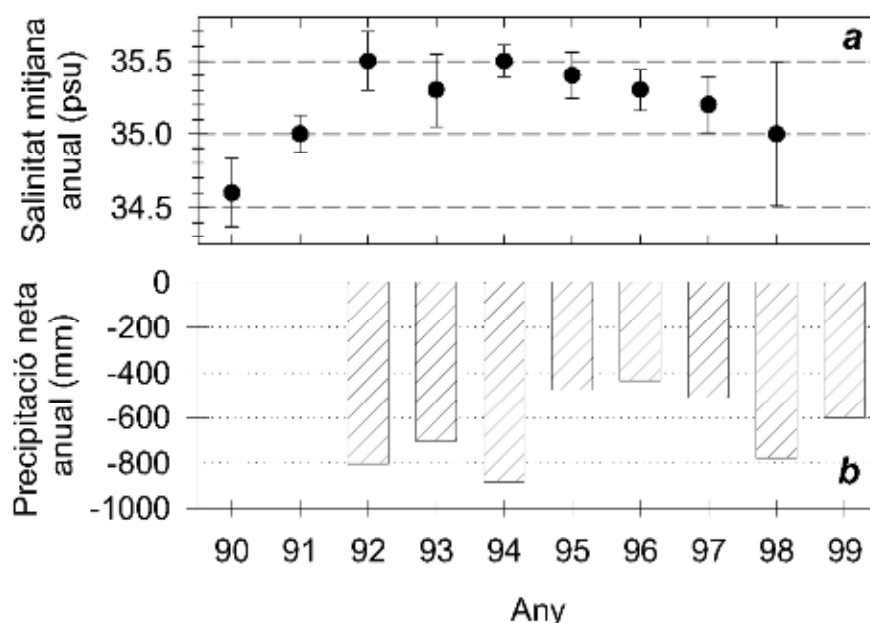


Figura 2.16 Salinitat del punt central i precipitació neta al llarg de la dècada dels 90. (a) Mitjanes anuals de salinitat, (b) precipitació neta acumulada anual.

Concentracions de nutrients i clorofil·la a

L'amoni (Figura 2.17a) presenta una alta variabilitat que pràcticament abasta tres ordres de magnitud, des de menys de dècimes fins a prop de deu micromolar. El nitrit (Figura 2.17b) mostra uns valors un ordre de magnitud inferiors als d'amoni mentre que el nitrat (Figura 2.17c) oscil·la en un rang semblant a l'amoni. El fosfat (Figura 2.17d) mostra poca variabilitat durant els primers dos anys, mantenint-se en les dècimes de micromolar. A partir d'inicis de 1993 davalla sensiblement fins a les centèsimes de micromolar amb una major variabilitat. El quocient entre la concentració de nitrogen inorgànic dissolt total i de fosfat (N/P) es troba entre les dècimes i la desena o fins i tot les centenars, com cap a la tardor de 1994 - hivern de 1995 (Figura 2.17e). La concentració de clorofil·la a (Figura 2.17f) es troba entre 1 i 10 mg m⁻³ la major part del temps, excepte a principis de primavera, en que baixa a concentracions inferiors, essent 1994 l'any que mostra els valors mínims absoluts de la sèrie (0.1 i 0.5 mg m⁻³ per a la capa fons i superficial respectivament).

Malgrat la seva alta variabilitat, es pot observar una certa estacionalitat en els valors de nitrat i nitrit (Figura 2.18b, c), davallant a principis d'any fins entrar la primavera, i acabant amb valors alts de nou ja a finals d'estiu i durant la tardor, a diferència de la sèrie d'amoni, en que no se n'observa cap (Figura 2.18a). En l'evolució del fosfat s'aprecia un cert increment cap a la primavera - estiu i un decrement a la tardor - hivern, essent les concentracions de setembre les més baixes d'entre els mesos de primavera, estiu i tardor (Figura 2.18d). El quocient N/P mostra els valors mínims anuals entre finals de primavera i mitjans d'estiu, i torna a mostrar un

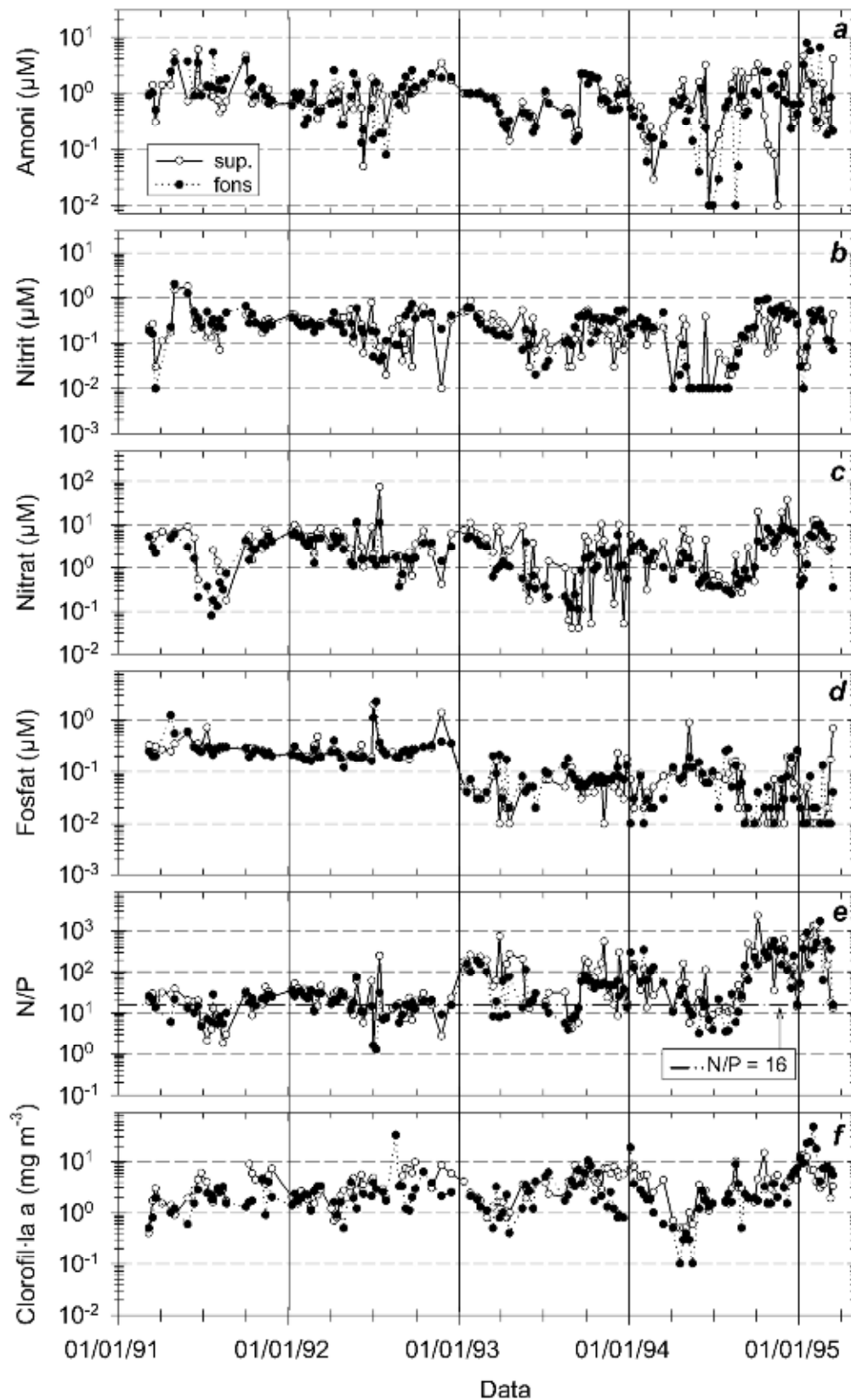


Figura 2.17 Concentració de nutrients i clorofil·la a en la columna d'aigua de la Badia dels Alfacs entre 1991 i 1995: (a) NH_4^+ , (b) NO_2^- , (c) NO_3^- , (d) PO_4^{3-} , (e) N/P, (f) Clorofil·la a. Dades del Centre Nacional d'Aqüicultura-IRTA, expressades en μM excepte les de clorofil·la a, en mg m^{-3} .

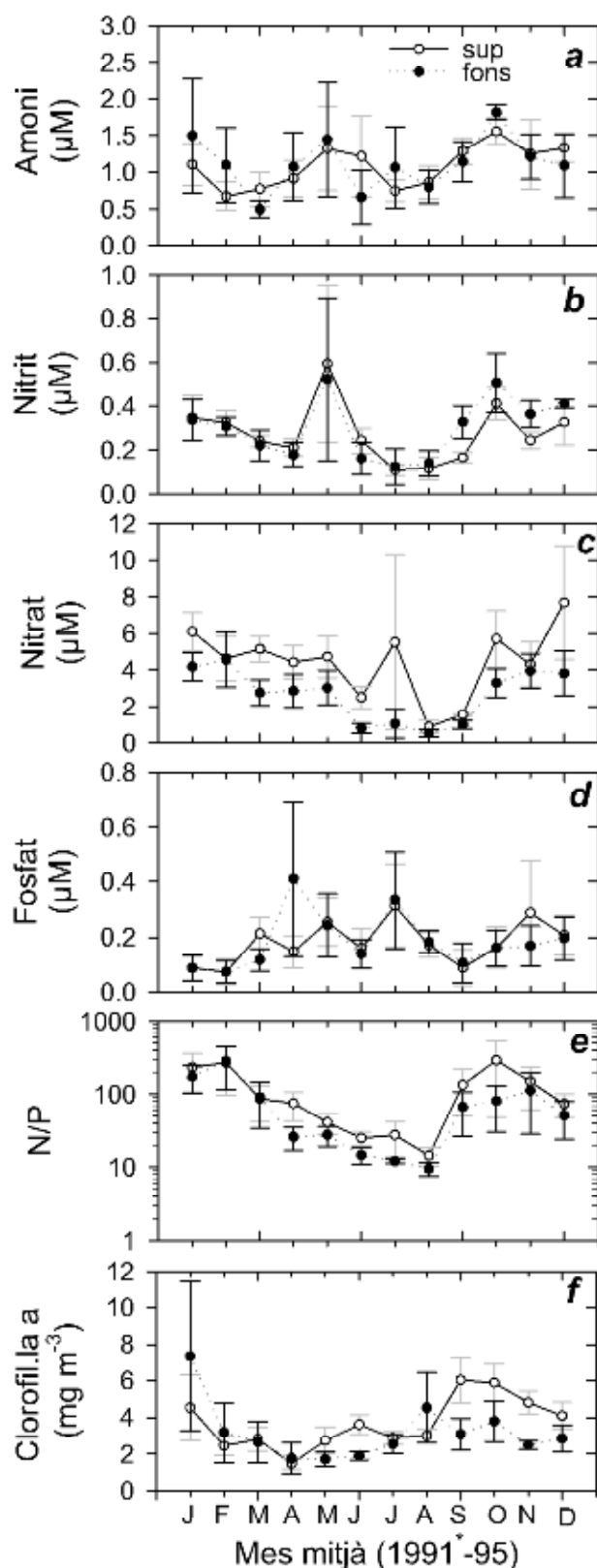


Figura 2.18 Evolució estacional de la concentració en la columna d'aigua de la badia dels Alfacs de: (a) amoni, (b) nitrit, (c) nitrat, (d) fosfat, (e) N/P, (f) clorofil·la a. Les unitats dels nutrients són μM i les de Cla són mg m^{-3} . Les dades són mitjanes de cada més de l'any per a tots els anys de que es disposa dades (* entre 1991 i 1995 excepte per Cla, entre 1990 i 1995), separades per capa superficial (sup.) i capa profunda (fons).

altre mínim relatiu a finals de tardor (a partir de novembre a la capa superficial i el desembre a les dues capes (Figura 2.18e). La concentració de clorofil·la a mostra una pujada anual des d'inicis de primavera fins a finals d'estiu o tardor, en que torna a descendir (Figura 2.18f). A partir de maig les concentracions de clorofil·la a de la capa fonda i superficial comencen a ser diferents, diferències que es mantenen fins novembre, amb l'excepció dels mesos de juliol i agost. Per als nutrients tan sols s'observa una diferència entre les mitjanes de les dues capes mantinguda la major part de l'any per al nitrat (Figura 2.18c).

Les concentracions de nutrients no mostren canvis significatius pel conjunt d'anys en que es disposen dades ($p > 0.05$, $n=141$, dades no mostrades). Ara bé, sembla que en aquests cinc anys ha hagut dos períodes amb diferents tendències: els tres primers anys (91-93), en que semblaria existir una davallada de la tendència general de les sèries de nutrients, i 1994 i inicis de 1995, en que algunes concentracions de nutrients semblen recuperar-se. L'anàlisi estadística d'aquests dos períodes per separat (Taula 2.10) confirma l'existència de tendències negatives estadísticament significatives entre 1991 i 1993 en el cas de les concentracions d'amoni ($p < 0.01$) i de nitrat ($p < 0.05$) de la capa de fons i de nitrit de la capa superficial ($p < 0.05$). Els resultats corresponents a 1994 mostren tendències estadísticament significatives però se les ha de prestar poca atenció aquí per tractar-se d'un sol cicle anual. La relació N/P, pel contrari, tendeix a augmentar 0.25 d^{-1} per la capa superficial, i 0.19 d^{-1} per la capa profunda ($p < 0.0001$ en ambdós casos, a partir del conjunt de dades de 1991-95; es mostren valors superiors a la Taula 2.10, que corresponen a considerar només les dades de l'any 1994, mostrades a Figura 2.17e, on hi ha un increment anual important d'aquesta relació N/P). Les concentracions de clorofil·la a, per la seva banda, també tendeixen a augmentar de l'ordre de $1.6 \times 10^{-3} \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ a la capa superficial ($p < 0.01$) i de l'ordre de $3.7 \times 10^{-3} \text{ mg m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ a la capa profunda ($p < 0.001$), per als 5 anys considerats (dades no mostrades).

Els histogrames de freqüències per a tot el període 1986-1997 indiquen que possiblement ha existit una disminució de les concentracions de les tres espècies químiques del nitrogen inorgànic dissolt al llarg de la dècada en el conjunt de tota la columna d'aigua (Figura 2.19a, Figura 2.20a, Figura 2.21a per a l'amoni, nitrit i nitrat, respectivament). Aquestes tendències es mostren estadísticament significatives per al nitrit i nitrat únicament (pendents igual a 5×10^{-4} i $5 \times 10^{-5} \text{ } \mu\text{M d}^{-1}$ respectivament, $p < 0.01$), però no per a l'amoni, ni per a la suma de tot el nitrogen inorgànic dissolt (Taula 2.11). Tampoc el fosfat, el quocient N/P o la Cla mostren correlació significativa amb el temps, malgrat el que poguessin semblar alguns dels seus histogrames (Figura 2.22a, Figura 2.23a, Figura 2.24a) o a partir de la taula de dades (Taula 2.12). Per capes es poden observar en general les mateixes pautes de distribució de valors que s'ha descrit anteriorment en els histogrames (Figura 2.19b fins a Figura 2.24b).

Taula 2.10 Tendències temporals dins de la sèrie de concentració de nutrients entre 1991 i 1994^a. Es mostren els paràmetres de l'equació ($Y=Y_0+aX$) de les regressions estadísticament significatives: terme independent (Y_0), pendent de la recta (a), el coeficient de correlació (r), i el grau de significació (* quan $p<0.05$, ** quan $p<0.01$, *** quan $p<0.001$). Unitats: nutrients en μM , Clorofil·la a en mg m^{-3} , temps en dies. El fosfat del període 1991-1993 no s'ha inclòs en l'anàlisi (veure text per més detalls).

		1991 - 1993				1994 ^a			
		Y_0	a	r	p	Y_0	a	r	p
NH_4^+	sup.								
	fons	66.1	-0.0009	0.31	**	-363	0.0051	0.42	**
NO_2	sup.	12.3	-0.0002	0.20	*	-32.4	0.0005	0.31	*
	fons					-38.6	0.0005	0.28	*
NO_3^-	sup.					-996	0.0141	0.28	*
	fons	130	-0.0018	0.25	*	-772	0.0109	0.48	***
PO_4^{3-}									
N/P	sup.					-42449	1.2	0.37	**
	fons					-32431	0.9	0.42	**
Cla	sup.					-560	0.0079	0.30	**
	fons	-177	0.0026	0.35	***	-1795	0.0253	0.40	**

^a S'ha indicat el segon període de la sèrie com a 1994 per correspondre a la major part de la sèrie malgrat també inclou l'inici de 1995 de que consta la sèrie.

Taula 2.11 Anàlisi de les concentracions de nutrients (μM), la taxa N/P i la concentració de clorofil·la a (Cla, mg m^{-3}) amb el temps, en la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997. Dades de diverses procedències ($n=344$, veure text per més detalls). S'han ombrejat els valors estadísticament significatius ($p<0.05$).

Variable	NH_4^+	NO_2	NO_3^-	NID	N/P	PO_4^{3-}	Cla
Data	0.00	-0.19	-0.13	-0.11	0.09	0.04	0.02
Cla	0.01	-0.07	-0.00	0.00	0.18	-0.12	1

Taula 2.12 Concentracions de Clorofil·la a mitjanes mensuals (mg m⁻³) entre 1990 i 1995. Dades del Centre Nacional d'Aqüicultura-IRTA.

Mes	90	91	92	93	94	95	mitjana
Capa superficial							
1		0,98	1,93	2,47	6,77	10,48	4,83
2		1,38	1,63	1,85	3,85	3,53	2,45
3		1,70	2,50	1,23	4,40	4,15	2,68
4		1,63	1,52	1,13	0,57	2,43	1,52
5	1,37	1,43	3,57	2,70	1,40	5,85	2,42
6	3,53	4,43	4,50	3,93	1,65		3,49
7	3,70	2,47	3,40	3,03	1,70		3,02
8	1,85	2,53	3,30	3,04	4,18		3,13
9	5,30	9,50	7,10	6,35	1,97		5,74
10	2,75	4,86	8,20	5,65	8,00		5,64
11	2,63	5,25	5,70	6,30	4,15		4,91
12	1,40	4,00	4,90	5,77	4,40		4,25
Mitjana	3,03	2,99	3,69	3,88	3,61	5,61	3,67
Capa profunda							
1		0,90	1,83	2,67	8,40	22,96	8,36
2		0,80	2,03	1,55	1,70	9,73	2,96
3		1,07	3,30	1,40	0,60	6,80	2,80
4		0,90	1,15	1,20	0,30	5,18	1,98
5	1,00	1,10	2,37	2,43	0,50	2,75	1,54
6	1,40	1,43	2,20	2,65	1,80		1,79
7	2,20	2,13	2,20	4,60	1,60		2,66
8	2,20	2,55	12,20	2,24	3,42		4,18
9	5,35	0,90	2,10	4,93	2,03		3,45
10	2,60	1,30	6,30	6,60	2,13		3,39
11	2,20	2,85	2,95	1,78	2,58		2,43
12	1,75	3,10	3,40	0,83	5,13		3,04
Mitjana	2,46	1,63	3,11	2,84	2,68	11,21	3,30
Columna d'aigua							
1		0,94	1,88	2,57	7,58	16,72	6,59
2		1,09	1,83	1,70	2,78	6,63	2,71
3		1,38	2,90	1,33	2,50	5,29	2,74
4		1,34	1,36	1,17	0,43	3,80	1,73
5	1,18	1,26	2,97	2,57	0,95	4,30	1,98
6	2,46	2,93	3,58	3,42	1,73		2,69
7	2,95	2,30	2,73	3,82	1,65		2,83
8	2,03	2,54	9,98	2,64	3,80		3,69
9	5,33	5,20	4,60	5,64	2,00		4,59
10	2,68	3,08	7,25	6,13	5,07		4,51
11	2,42	4,05	4,33	4,29	3,36		3,71
12	1,58	3,55	4,15	3,30	4,76		3,65
Mitjana	2,75	2,32	3,40	3,37	3,15	8,33	3,49

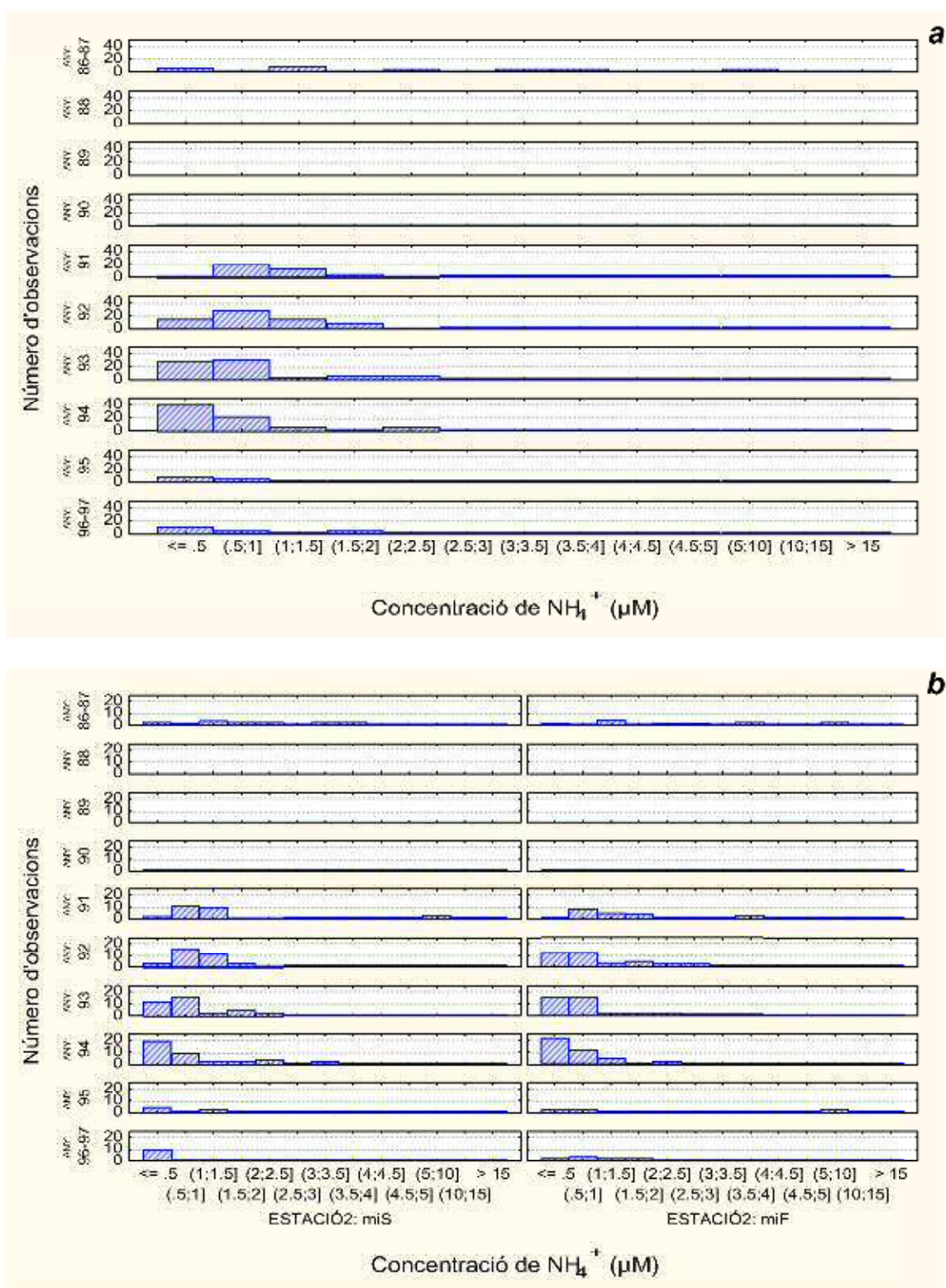


Figura 2.19 Histograma de freqüències de la concentració d'amoni (NH_4^+ , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls).

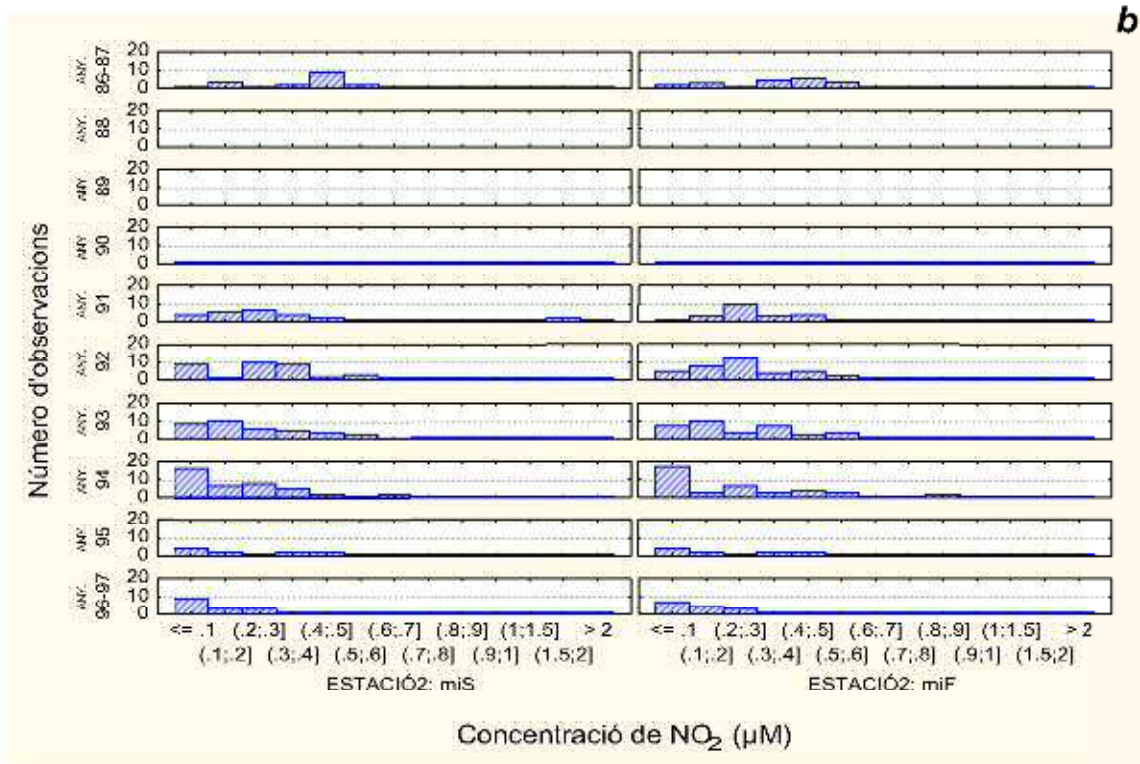
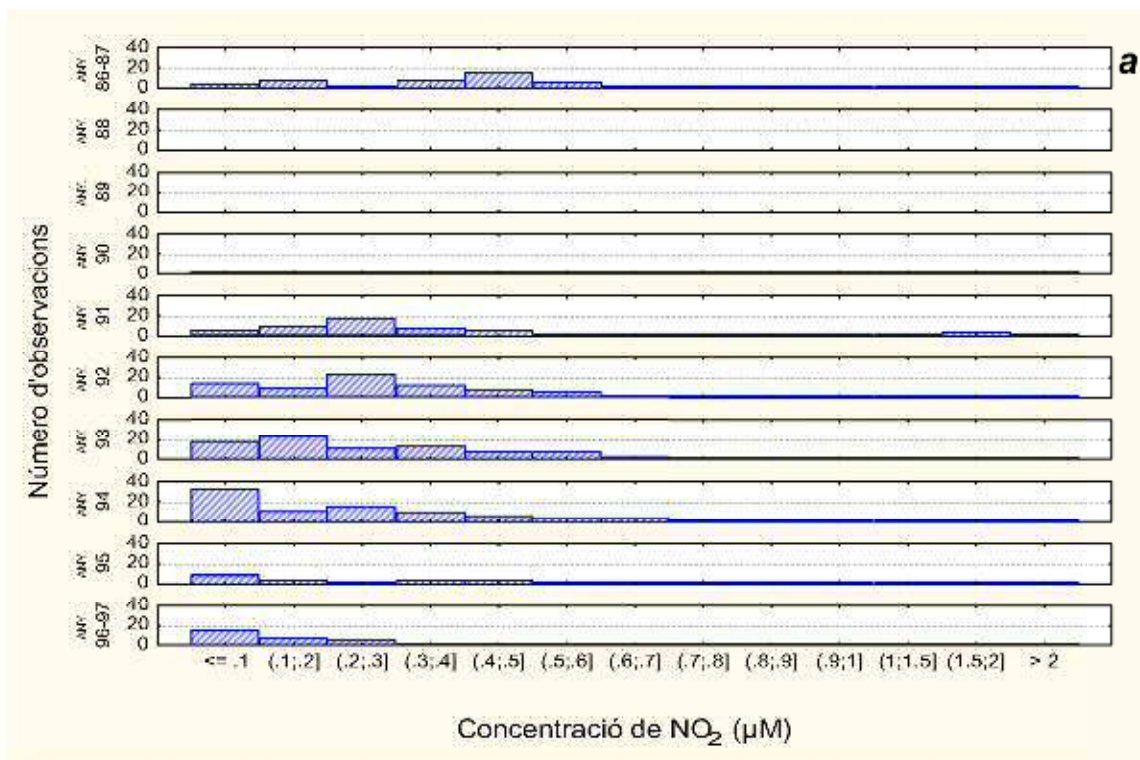


Figura 2.20 Histograma de freqüències de la concentració de nitrit (NO_2 , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls).

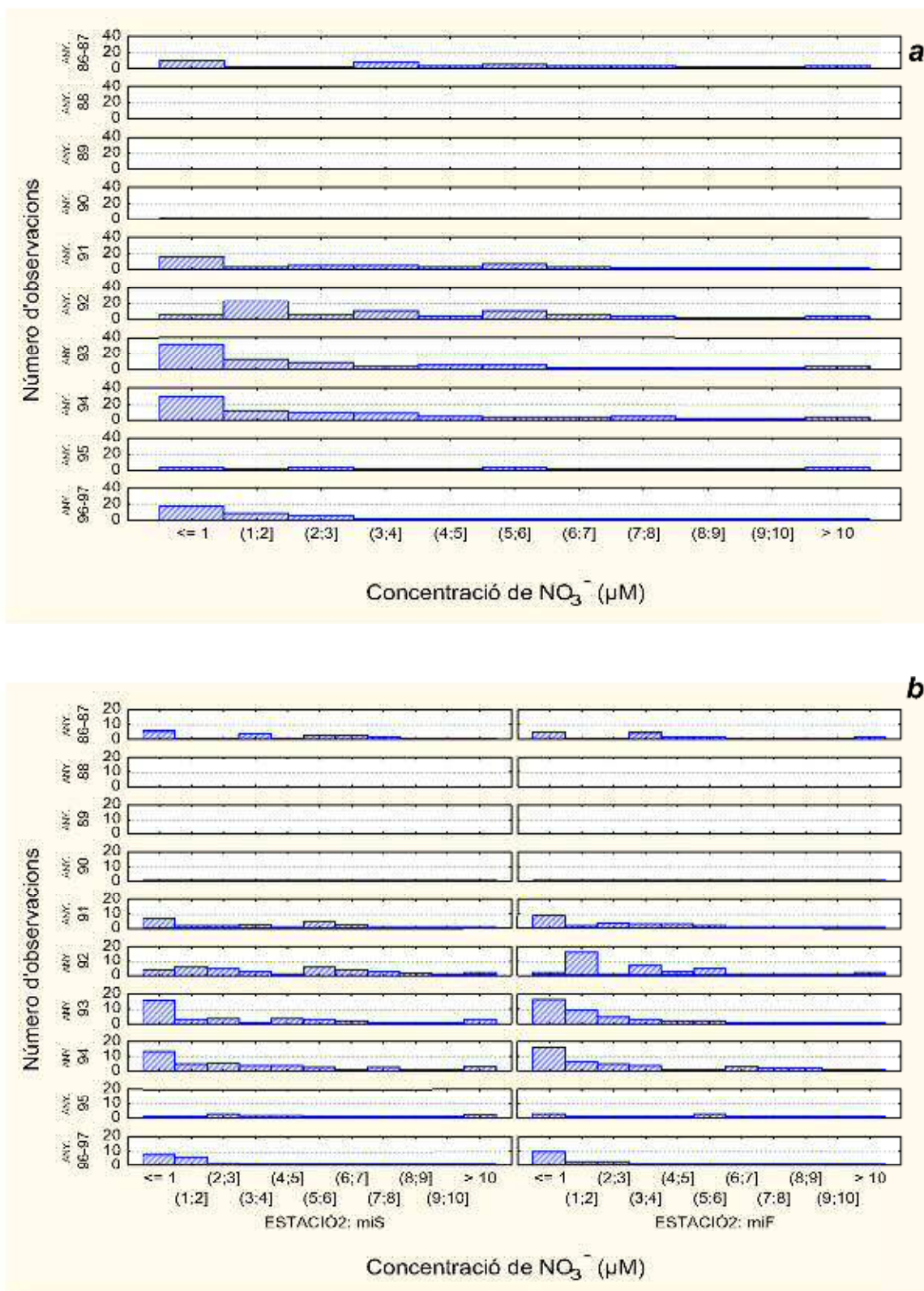


Figura 2.21 Histograma de freqüències de la concentració de nitrat (NO₃⁻, en µM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls).

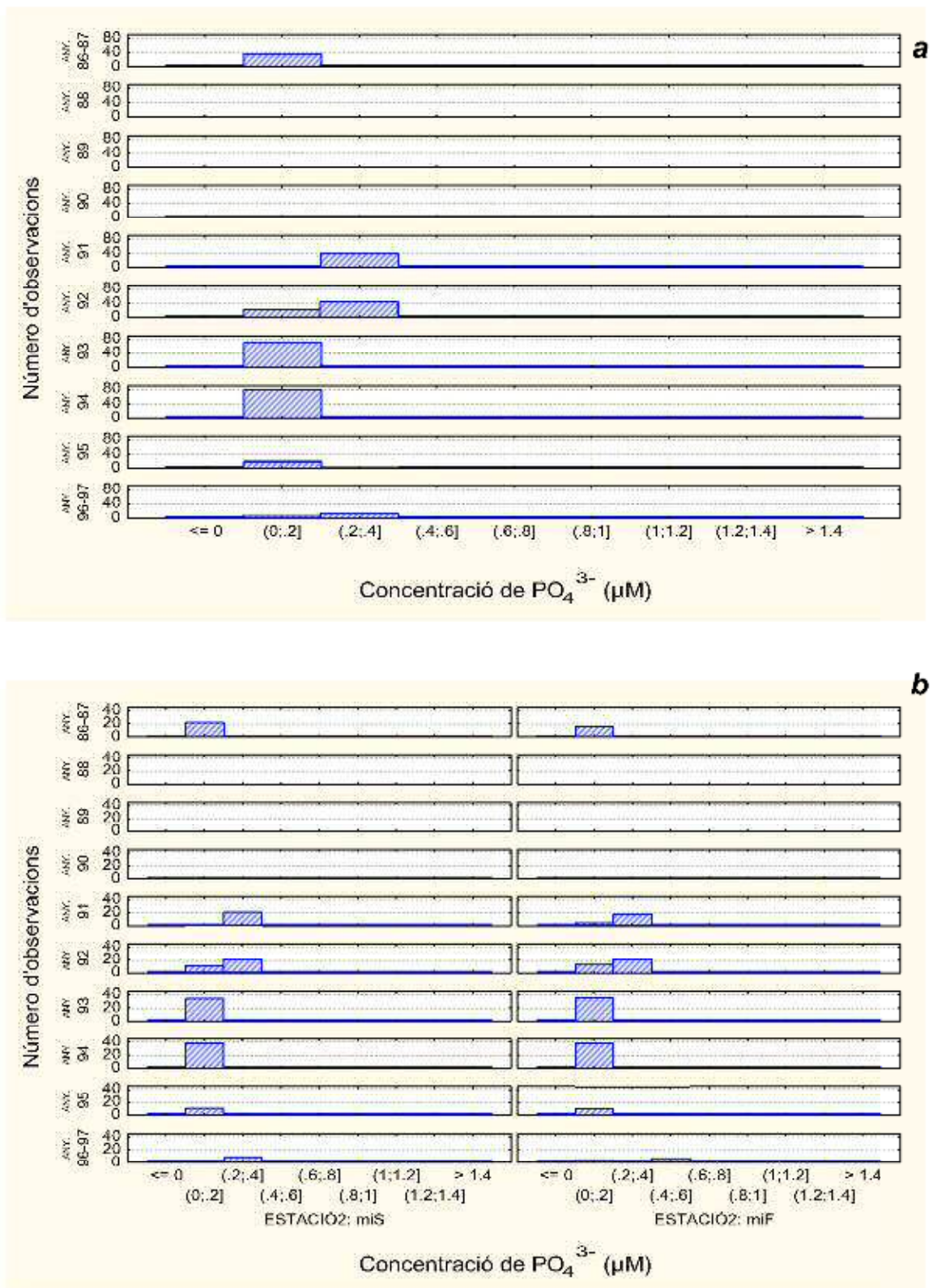


Figura 2.22 Histograma de freqüències de la concentració de fosfat (PO_4^{3-} , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls).

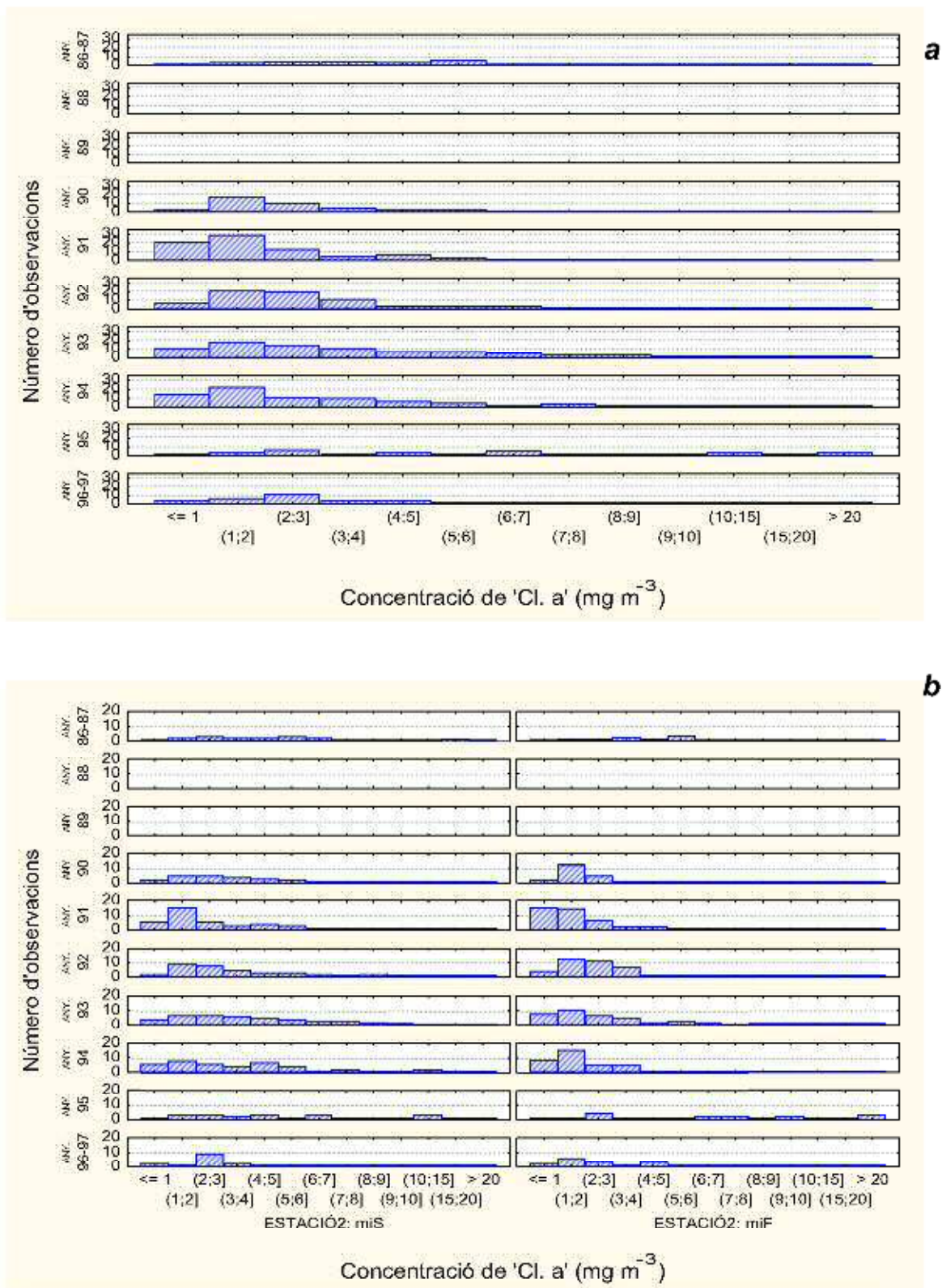


Figura 2.24 Histograma de freqüències de la concentració de clorofil·la a (Cl.a, en mg m^{-3}) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (miS) i profunda (miF) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls).

Per últim, els resultats de les correlacions entre variables no deixen gens clara quina relació funcional existeix entre elles. Cal destacar que la clorofil·la a mostra correlacions significatives estadísticament, malgrat molt baixes, únicament amb la concentració de fosfat (negativa) i el quocient N/P (positiva), però no amb cap de les concentracions de nitrogen (Taula 2.11). Per altra banda, en analitzar només el conjunt de la sèrie de 1991 a 1995, i per als valors de tota la columna d'aigua, no sembla observar-se cap relació clara entre la concentració de clorofil·la a i la de nitrat per un costat (Figura 2.25a) ni amb la de fosfat per l'altre (Figura 2.25b).

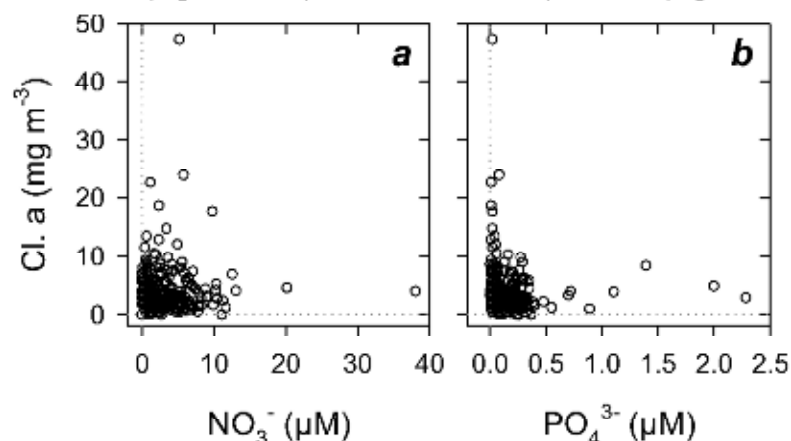


Figura 2.25 Relació entre el nitrat (NO_3^-) i fosfat (PO_4^{3-}) respecte la clorofil·la a (Cl.a): (a) concentració de nitrat respecte Cl.a, (b) concentració de fosfat respecte la de Cl.a. Dades setmanals del Centre Nacional d'Aqüicultura de l'IRTA entre 1990 i 1995 de la capa superficial i profunda de columna d'aigua de la Badia dels Alfacs.

Canals d'entrada

L'aigua dels canals porta, tant en el període de 1986-87 com en el de 1996-97, concentracions mitjanes de l'ordre de les desenes de μM d'amoni i nitrat, de l'ordre de les unitats de μM de nitrit, i entre les dècimes i les unitats de μM de fosfat (Taula 2.13). La mitjana dels quocients N/P de les dades de 1986-87 va ser de 67.3, mentre que per 1996-97 va ser dos ordres de magnitud superior.

L'amoni, nitrat, i el nitrogen inorgànic dissolt són de l'ordre de 3 vegades superiors en 1996-97 que en 1986-87, els dos períodes de mostreig per als quals es disposen dades, mentre que el quocient N/P és 30 vegades superior (veure histogrames a Figura 2.26, i test de Kolmogorov-Smirnov de comparació no paramètrica de les mitjanes a Taula 2.13).

El canal que travessa la llacuna de l'Encanyissada abans d'entrar a la badia conté entre 4.4 i 8.2 vegades menys concentració de les espècies químiques de nitrogen respecte els canals que no en travessen cap (canals de la Sèquia de l'Ala, Desguàs General, Taula 2.14, Figura 1.4). Això equival a que l'aigua de desguàs dels arrossars que travessa una llacuna costanera redueixi significativament la seva càrrega de nitrogen en les tres formes inorgàniques dissoltes entre un 23 % i un 12 %, respectivament, abans d'arribar al mar, mentre que el fosfat no mostra diferències significatives.

Taula 2.13 Test no paramètric de Kolmogorov-Smirnov de comparació de les mitjanes per als dos casos de "període de mostreig", aplicat a les concentracions de nutrients (μM) i la taxa N/P analitzades en l'aigua dels canals de desguàs dels arrossars i de la principal llacuna costanera que vessa a la badia dels Alfacs (Sèquia de l'Ala, Desguàs General i Sortida de la llacuna de l'Encanyissada). NID: Nitrogen inorgànic dissolt. Resultats ombrejats són estadísticament significatius, amb nivell de significació: * quan $p < 0.05$, ** quan $p < 0.01$, * quan $p < 0.001$.**

Variable	Mitjana		Error est.		N		nivell-p
	86-87	96-97	86-87	96-97	86-87	96-97	
Amoni	19.3	76.1	± 5	± 29	29	24	**
Nitrit	3.34	6.35	± 1	± 2	30	24	
Nitrat	29.8	85.3	± 7	± 16	30	24	*
NID	51.9	168	± 10	± 33	30	24	**
Fosfat	1.03	0.603	± 0	± 0	30	24	
N/P	67.3	2072	± 13	± 875	28	24	***

Les concentracions d'amoni i de fosfat en l'aigua de sortida de la depuradora són superiors a les que trobem als canals de desguàs dels arrossars, mentre que les de nitrat són clarament inferiors (Taula 2.15). La concentració de nitrogen inorgànic dissolt és superior en el canal de la depuradora que en els canals que desguassen directament dels arrossars ($270 \mu\text{M}$ front els $175 \mu\text{M}$ de mitjana) i molt superiors que en l'aigua que abans ha passat per una llacuna costanera (de l'ordre de $30 \mu\text{M}$). El fosfat presenta per la seva banda una concentració de $27 \pm 15 \mu\text{M}$, mentre que els canals dels arrossars porten prop d'una unitat de μM de PO_4^{3-} , molt menys en comparació. De totes formes, la càrrega real per la badia que suposen aquests aportes és baixa en general atès que el flux d'aigua a la depuradora és de $5 \cdot 10^3 \text{ l dia}^{-1}$ o excepcionalment de $10 \cdot 10^3 \text{ l d}^{-1}$ a l'estiu, segons dades dels responsables de la mateixa mentre que els altres canals vessen entre $1 \text{ i } 3.5 \cdot 10^8 \text{ l d}^{-1}$, cinc ordres de magnitud per sobre.

Taula 2.14 Test no paramètric de Kolmogorov-Smirnov de comparació de les mitjanes per als dos casos de "canal que travessa llacuna vs. canal que no en travessa", aplicat a les concentracions de nutrients (μM) i la taxa N/P analitzades en l'aigua dels canals de desguàs dels arrossars i de la principal llacuna costanera que vessa a la badia dels Alfacs (Sèquia de l'Ala, Desguàs General i Sortida de la llacuna de l'Encanyissada). Resultats ombrejats són estadísticament significatius, amb nivell de significació: * quan $p < 0.05$, ** quan $p < 0.01$, *** quan $p < 0.001$

Variable	Mitjana	Error est.	Mitjana	Error est.	N	N	nivell-p
	llacuna	llacuna	no llac.	no llac.	llacuna	no llac.	
Amoni	9.70	± 3	79.1	± 26	26	27	***
Nitrit	1.15	± 0	8.20	± 1	27	27	***
Nitrat	20.2	± 9	88.7	± 11	27	27	***
NID	30.7	± 11	176	± 27	27	27	***
Fosfat	0.634	± 0	1.05	± 0	27	27	
N/P	76.8	± 17	1981	± 844	27	25	***

Taula 2.15 Concentracions de nutrients del canal de sortida de la depuradora.

Variable	mitjanes	error est.	n
NH4 (μM)	252,4	84,96	7
NO2 (μM)	5,0	2,54	7
NO3 (μM)	13,9	3,06	7
PO4 (μM)	26,9	15,39	7

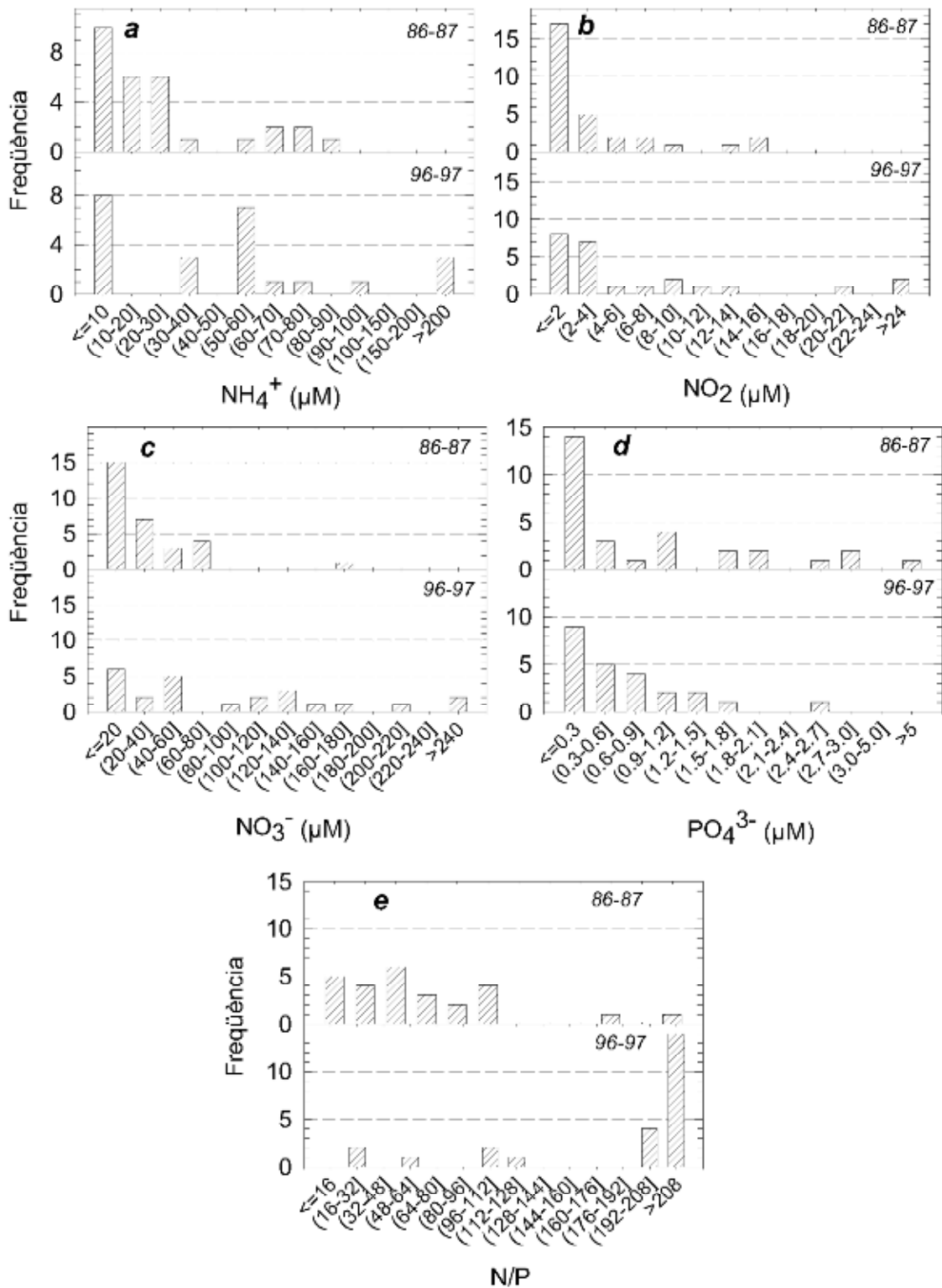


Figura 2.26 Distribució de freqüències de concentració de nutrients en l'aigua dels canals d'entrada a la badia dels Alfacs, en 1986-87 i 1996-97: (a) NH_4^+ , (b) NO_2 , (c) NO_3^- , (d) PO_4^{3-} , (e) N/P. Els canals considerats són el del Desguàs General, l'Encanyissada i la Sèquia del l'Ala, sense comptar amb el de la depuradora.

Discussió

Evolució de la salinitat

La salinitat mitjana de l'aigua d'un estuari indica la quantitat d'aigua dolça present al sistema. Canvis en aquesta quantitat poden provenir de canvis en els aportos nets d'aigua dolça o bé de canvis en el seu temps de residència. Per exemple, una disminució de la salinitat mitjana anual com la que sembla observar-se entre 1992 i 1998 (Figura 2.16) podria ser conseqüència d'un augment en els aportos dels canals, d'un increment de la pluviositat o de canvis en la circulació estuariana. No es disposa de dades per contrastar ni la primera hipòtesi ni la tercera, malgrat es desconeix l'existència de canvis notables en la gestió dels recs de l'hemidelta dret de l'Ebre. Pel que fa a la precipitació, val a dir que, malgrat la seva correlació amb la salinitat (Figura 2.27), les relacions entre ambdues variables no són simples (vegeu la dispersió a la Figura 2.16). Els canvis de precipitació d'un any per l'altre són de l'ordre de 400 a $-260 \text{ l m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, mentre que els de salinitat corresponen a canvis en la quantitat d'aigua dolça, entre 60 i $-20 \text{ l m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ pel conjunt de la badia. Això es deu a que la precipitació no es barreja amb la totalitat de l'aigua de la badia sinó tan sols amb una capa més o menys superficial (que precisament és la capa que té una menor temps de residència). Així doncs, en un estuari amb poca barreja vertical, un increment en la precipitació neta no afectaria massa a la salinitat mitjana, ja que gran part de l'aigua aniria ràpidament cap a mar obert. La salinitat mitjana depèn també de les forces de barreja, la principal de les quals és, en el nostre cas, el vent. Efectivament hem trobat una correlació positiva entre el vent i la salinitat mitjana ($r=0.29$, $p<0.05$). Aquesta correlació malgrat força significativa, és relativament feble degut al fet que el vent que influeix sobre la salinitat és només el que bufa després d'episodis de precipitació.

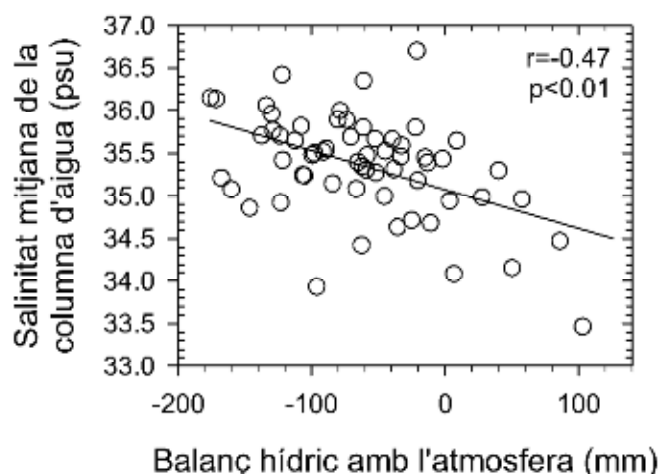


Figura 2.27 Relació entre la salinitat mitjana de la columna d'aigua i el balanç hídric amb l'atmosfera (precipitació menys ET_0). Dades mensuals dels anys 1992 a 1997 ($n=61$), mitjanes per la salinitat i acumulades per al balanç hídric.

Els canvis estacionals de la salinitat mitjana són força complexos. Recordem que durant el període en que els canals estan tancats, la badia rep, en teoria, menys aport d'aigua dolça que durant el període de cultiu de l'arròs, en que els canals estan oberts (de l'ordre de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en *canals oberts* i $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en *canals tancats*; Capítol 1, plana 23). Efectivament, és al mes de maig (Figura 2.10a) quan baixa la salinitat, però en canvi, no és al novembre quan aquesta torna a pujar sinó més tard, cap a febrer. Creiem que els valors de salinitat es mantenen baixos fins el febrer a causa de les pluges i les baixes temperatures, que donen un balanç hídric força positiu entre novembre i gener (Figura 2.10b).

Les variacions en la salinitat durant l'època de "canals tancats" semblen deure's fonamentalment a les precipitacions, a partir del que es pot observar en casos concrets (Figura 2.11a, b; Figura 2.12), com per exemple, aquells en que la salinitat mitjana es trobava per sota de 34.2 psu (entre el 19 de gener i el 13 de febrer de 1997, i entre el 20 de desembre de 1997 i el 19 de gener de 1998). De vegades, la salinitat mitjana respon amb un cert retard a la precipitació: les davallades en la salinitat mitjana coincideixen generalment en el temps amb precipitacions importants, però els períodes de major aigua dolça a la capa superficial dels anys estudiats es troben decalats unes 2-3 setmanes respecte els episodis de precipitació més intensa. Això fa pensar que la precipitació que està afectant realment la salinitat mitjana de la columna d'aigua podria ser, no tant la precipitació directa sobre la badia, sinó aquella que cau a la part propera de la conca i que necessita encara algunes setmanes per circular pel terreny (a nivell freàtic i/o superficial) fins arribar-hi. No s'observaria decalatge si la precipitació afectés a la salinitat de forma directa i immediata, com passa per exemple a l'estuari mediterrani Palmiet de Sud-àfrica (Largier 1986) o en el fiord novazelandès de Doubtful Sound (Gibbs *et al.* 2000). En l'època de novembre a abril, els canals de desguàs dels arrossars estan majoritàriament tancats, obrint-se només eventualment en cas de pluges intenses. Per tant és factible que el flux d'aigua dolça d'entrada a la badia (necessari per mantenir els valors baixos de salinitat) vingui ocasionalment dels canals però també en part del freàtic. D'aquesta forma, l'aigua freàtica torna a aparèixer a la badia dels Alfacs com a hipòtesi possible per a explicar-ne algunes característiques hidrològiques, després de que Camp i Delgado (1987) estimessin, com a primera aproximació, una alimentació d'aigua dolça a partir del freàtic de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de mitjana per a l'època de *canals tancats*. La seva importància, doncs, seria considerable llavors al llarg de tota la línia de costa nord.

Comparació amb altres estuaris:

Els aports d'aigua dolça

El funcionament de la Badia dels Alfacs segueix els patrons de circulació descrits a la literatura per a altres badies i estuaris mediterranis⁶, tot i que cal no oblidar les seves singularitats, les més importants de les quals semblen ser conseqüència de les pluges torrencials ocasionals a l'estiu i tardor i els aports d'aigua dolça a través dels canals de desguàs dels arrossars.

Així, l'estratificació de la columna d'aigua i el relatiu "estancament" de la capa fonda que comporta un risc potencial d'aparició d'hipòxies a Alfacs, no és just després del període de major precipitació com en altres sistemes comparables (després de la tardor a Alfacs - Taula 1.5, Figura 2.10b -, després de l'hivern en altres sistemes micromareals descrits a la literatura, i en Alfacs, excepcionalment, el 1997), sinó que és posterior al període de pluges tempestuoses (Figura 2.11b), acompanyades de les velocitats mínimes de vent de tot l'any (Figura 2.10d, Figura 2.11c) i les temperatures més altes (Figura 2.2a).

En altres estuaris l'aigua caiguda durant l'hivern produeix l'estratificació més important de l'any, deixant el fons de la columna en una situació susceptible de desenvolupar fenòmens hipòxics en mesos següents, com en el cas de Peel-Harvey (Hearn i Robson 2001, Annex B, plana 326). Malgrat també es produeix un gradient salí important a l'hivern en Alfacs, arribant a valors de 6 psu de diferència entre les mitjanes de salinitat de les dues capes (gener de 1997, Figura 2.7, Figura 2.8a), els períodes hipòxics detectats no es produeixen sinó en els períodes en que la capa fonda té més influència de l'aigua de mar, i conté salinitats superiors a 36 o, fins i tot 37 psu, com al voltant del dia 11 de setembre de 1997 (Figura 2.12c).

Dades meteorològiques de l'àrea de la Badia de Tomales per al període de 1987 a 1996 mostren que, per a evaporacions similars a les d'Alfacs (ca. 4 mm d⁻¹ de màxima estival), les pluges màximes han estat inferiors a 10 mm d⁻¹ excepte singulars episodis hivernals en que van arribar excepcionalment a 40 mm d⁻¹, però cap any presenten precipitacions torrencials estivals (Smith i Hollibaugh 1997). Aquesta és una diferència meteorològica significativa de la zona d'Alfacs respecte a altres badies estuàries de clima mediterrani. Es desconeix realment de quina manera poden afectar aquests episodis a l'aparició de les hipòxies de finals d'estiu, per que si bé per un costat actuen incrementant l'estratificació vertical i per tant reduint la renovació de l'aigua fonda, també s'espera que generin en certa mesura circulació estuària bicapa per gradients de densitat (veure Capítol 1, plana 15). Aquesta qüestió, per tal de ser resposta adequadament, necessitaria de models hidrodinàmics específics que quantifiquessin cada procés esmentat amb millors mesures directes.

⁶ Per *estuaris mediterranis*, s'entenen aquells que "reben la major part del flux del riu a l'hivern, i l'intercanvi amb l'oceà és generalment prou feble com per mantenir deprimides les salinitats estuàries per sota dels valors oceànics al llarg de la primavera, creant estratificació vertical" (Hearn i Robson 2001).

L'altre fenomen descrit en estuaris mediterranis és la inversió ocasional en la circulació a causa de períodes d'hipersalinitat (Largier *et al.* 1997). Malgrat el dèficit hídric per via atmosfèrica comentat que experimenta la badia dels Alfacs, aquests no s'hi donen gràcies al suplement hídric constant que rep la badia pels canals de desguàs dels arrossars, especialment durant els mesos de màxim dèficit hídric.

Clorofil·la a i nutrients

La concentració de clorofil·la a trobada a la badia dels Alfacs ha estat dins el rang mig de les concentracions recollides a la literatura a ambients estuaris (Taula 2.16, tot i que cal tenir en compte que la columna d'aigua de la badia dels Alfacs és inferior a la de molts dels estuaris citats). Al fiord Gullmar de l'Skagerrak suec, per exemple, s'han descrit concentracions ocasionals de fins a 800 mg Cla m⁻² a la capa eufòtica (Lindahl i Hemroth 1983), mentre que a la badia de Chesapeake, per la seva banda, s'hi han trobat freqüents acumulacions primaverals de fins a 1000 mg Cla m⁻², fruit de desequilibris estacionals entre els processos productius i de consum de fitoplàncton, que van seguits de fenòmens hipòxics a la capa fonda (<20% saturació d'oxigen dissolt) en entrar l'estiu (Malone *et al.* 1996). En llocs amb menor producció, com a la badia dels Alfacs, el risc d'aquests desequilibris estacionals és menor, així com de les hipòxies que solen portar associades.

No s'ha trobat cap relació consistent entre la Clorofil·la a de la badia dels Alfacs i els principals nutrients com el nitrat i el fosfat (Figura 2.25), que pogués fer pensar que aquests la limitessin. Si que se sap, a partir d'estudis previs (Pérez *et al.* 1991), que el creixement de la fanerògama marina *Cymodocea nodosa* és limitat pel fòsfor i no pas pel nitrogen, a diferència del que passa amb altres fanerògames marines d'arreu del món (Duarte 1995, Valiela *et al.* 1997). Se sap també que el sediment segresta fòsfor (Vidal 1991), que hi ha molta activitat de la fosfatassa alcalina en la columna d'aigua (M. Pérez, com. pers.) i que la relació N/P tant dels canals com de l'aigua de la badia sembla favorable al nitrogen (Figura 2.17, Figura 2.26). A partir d'aquí es podria pensar que el fitoplàncton també podria estar limitat majoritàriament pel fòsfor malgrat d'aquesta limitació no s'han trobat evidències a les dades (Figura 2.25b), i més aviat els indicis trobats indiquen que la Cla i el fosfat es troben correlacionats negativament (Taula 2.11). El nitrogen no va mostrar tampoc cap relació amb la Clorofil·la a (Taula 2.11, Figura 2.25a), si bé és cert que la concentració de nitrogen inorgànic mostra un increment fort en passar de 1991-93 a 1994-95, que va coincidir amb un increment notable de la velocitat d'augment de la clorofil·la a (Taula 2.10). Així, les concentracions dels nutrients no semblen ser els principals factors que regulen la concentració de clorofil·la a.

Taula 2.16 Concentracions de Clorofil·la a en diferents estuaris (modificat a partir de Underwood i Kromkamp 1999 i altres fonts).

Estuari	Estació o període	Cla a mitjana (mg m ⁻³)	Cla màxima (mg m ⁻³)	Referències
EUROPA				
Oosterchelde	Exterior	3.0-7.4	14-43	Wetsteyn i Kromkamp 1994
	Central	3.0-6.6	16-36	
	Interior	3.6-9.1	10-50	
Westerschelde	Exterior	7.7-8.7	21-24	van Spaendonk <i>et al.</i> 1993
	Central	8.5-11.1	26-33	Kromkamp i Peene 1995
	Interior	7.7-20.1	21-41	
Badia dels Alfacs	Punt central	1.6-11	12-23	Aquest estudi
EUA				
Badia de San Francisco	Badia Sud		10-70	Cole i Cloern 1984, Smith <i>et al.</i> 1987
	San Pablo		6-14	Cloern 1996
	Badia Suisun	1.1-14.6	20-50	
Badia de Tomales	Exterior	7-8	6-12	Cole 1989
	Central	5-11	15-83	
	Interior	2.8-4	3-9	
	Mitjana	0.5-22.4		
Badia de Chesapeake	Exterior	0.8-8.9 ^a	25 ^a	Harding 1994
	Central	4.0-10.5 ^a	23 ^a	Boynton <i>et al.</i> 1982, Harding 1994
	Interior	2.1-16.1 ^a	23 ^a	Harding 1994
	Mitjana	2-55 ^b		Fisher <i>et al.</i> 1992
Badia de Tampa	Exterior	2-40		Wang <i>et al.</i> 1999
	Central	2-25		
	Interior	0.1-9		

Quan es van obtenir dades per diversos anys, es dona el rang de valors. ^aEls valors provenen de mitjanes ajustades al tractament per mínims quadrats, per corregir l'efecte de diferent mides mostrals (SAS Institute 1990).

^bValors discrets sense ser filtrats per cap tractament estadístic.

En altres badies com la badia de Tampa, a Florida (EUA, plana 325) la concentració de clorofil·la a ha mostrat estar altament correlacionada amb el nitrogen total en mitjanes anuals (Wang *et al.* 1999). A més, la reducció dels aportes de nitrogen per entrada en funcionament de la planta de depuració d'aigües residuals va anar seguida d'una reducció notable, tot i que decalada quatre anys, de les concentracions de clorofil·la a (Morrison *et al.* 1997). En la badia dels Alfacs també existeix reducció d'aports de nutrients per depuració d'aigües municipals: la depuradora de Sant Carles de la Ràpita elimina parcialment el nitrogen, encara que no el

fòsfor. Es desconeix l'efecte que pugui tenir aquesta concentració dels aportats al·lòctons de fòsfor d'origen domèstic, si bé s'ha detectat ocasionalment acumulacions puntuals extraordinàries de l'alga vermella *Alsidium corallinum* de l'ordre de 1300 gPS m⁻², properes al canal de desguàs de l'aigua de la depuradora, el que suposa més del doble de la biomassa màxima trobada en cap moment a la badia d'aquesta espècie. S'observa que la depuradora vessa a la badia relativament més fòsfor que nitrogen (aigua amb menor N/P) que els altres canals, però com el seu flux d'aigua és tan reduït (entre un 2 i un 6% de qualsevol dels altres tres canals principals), es creu que la seva influència sobre el conjunt de la badia dels Alfacs és mínima.

Canvis físico-químics en la dècada dels 90

La salinitat de l'aigua superficial de la badia dels Alfacs ha mostrat un augment significatiu mentre que la de l'aigua fonda ha mostrat una disminució, reduint-se així el gradient sal vertical al llarg de la dècada. Això pot estar relacionat, al menys parcialment, amb l'increment de la velocitat màxima diària del vent al llarg dels anys noranta (Taula 2.6), que permetria barrejar cada cop més la columna d'aigua. Si aquesta tendència es manté constant, el vent podria esdevenir un factor regulador, més important del que ja podria ser ara, en la prevenció de l'aparició o eventual finalització de les hipòxies i anòxies que hi podrien aparèixer en un futur (atès que ja hem vist que com més vent màxim diari, més petita l'estratificació de la columna d'aigua a causa d'una major barreja, sigui total o no - Figura 2.9 -, i menys hipòxies).

També s'ha observat un increment significatiu de les temperatures aèries mitjana i màxima diàries, i en major grau, de la temperatura aèria mínima diària que ha estat correlacionat significativament amb unes majors temperatures mínimes hivernals de l'aigua de fondària. L'escalfament detectat a la dècada dels noranta a la badia dels Alfacs podria anar en la mateixa línia que els escalfaments descrits en la temperatura dels oceans, que malgrat no segueixen una tendència monòtona al llarg de l'últim segle, si que detecten tendències significatives d'increments i decrements en funció de la dècada en qüestió, i descriuen un augment progressiu persistent des dels anys 70 ençà (Zhou *et al.* 1996). S'han descrit observacions similars en altres conques oceàniques i també en mars més petits com el Mar Adriàtic, Negre o Bàltic (Maddock i Swann 1977, Bindoff i Church 1992, Matthaeus i International Council for the Exploration of the Sea 1995, Curtis i Hastenrath 1999, Anderson *et al.* 1997, Dulcic *et al.* 1999, Degterev 2000). En el Mediterrani Occidental també s'ha observat un increment significatiu de la temperatura mitjana de l'aigua de la seva conca al llarg de 15-30 anys recents: entre 1973 i 1987 un increment de 0.4 °C a 80 m de fondària (Pasqual, comunicació personal a P. Francour, segons cita en Francour *et al.* 1994), i entre 1959 i 1989 un increment de 0.12 °C sota els 400m (Bethoux *et al.* 1990). Aquest escalfament podria implicar un major desplaçament del balanç d'oxigen dissolt cap a valors més negatius, atès que un mateix increment de temperatura augmenta més els processos de consum que els de producció (Marsh *et al.* 1986, Tilzer i Dubinsky 1987, Lefevre *et al.* 1994, Vergara *et al.* 1997).

Pel que fa als nutrients s'observa una major concentració de nitrogen en l'aigua dels canals de desguàs en 1996-97 que en 1986-87. Ara bé, aquest increment no sembla haver tingut conseqüències sobre la concentració de nitrogen inorgànic dissolt a la badia, que més aviat té tendència a disminuir, al menys pel que fa a les concentracions de nitrit i nitrat (Taula 2.11), pel que és possible que aquesta concentració estigui determinada per processos interns de la badia més que no pas per les descàrregues dels canals, o que els canvis en la qualitat de l'aigua dels canals, repercutits per al conjunt de la badia, quedin englobats en la variabilitat d'aquesta.

La pujada de les concentracions de nitrogen a l'aigua dels canals pot estar relacionada amb l'increment experimentat a les aigües del riu Ebre de nitrogen i fòsfor, passant entre els anys setanta i mitjans dels anys noranta de valors mitjans de concentració de nitrat de 48 a 145 μM i de fosfat de 2.08 a 9.38 μM (Ibáñez *et al.* 1995), amb una important disminució a partir de 1996 i fins a 2004 de la concentració de fosfat a causa d'un millor funcionament de les estacions depuradores d'aigües residuals urbanes (Ibáñez *et al.* 1999, [Ibáñez, 2007 #45]). Ara bé, hi ha una relativa incertesa sobre si aquests canvis en les concentracions de nutrients també van ocórrer a les badies del delta de l'Ebre.

Per tant, no podem parlar d'un augment recent de la disponibilitat de nutrients dissolts, al contrari del que s'ha documentat en altres àrees. Per exemple, la concentració de fosfat ha augmentat fins a 9 vegades en les aigües superficials del "Sound" de l'Skagerrak, la seva estreta zona de connexió en direcció cap al Mar Bàltic (plana 319), des de la dècada dels 40 fins a la dels 70. I molt a prop, en el Kattegat, s'ha detectat un increment menor però també estadísticament significatiu en el transcurs de 15 anys recents. Val a dir, però, que malgrat aquestes evidències constatades en la zona, no s'ha pogut demostrar tendències estadísticament significatives en el Fiord Gullmar de l'Skagerrak al llarg dels mateixos últims 15 anys en ajuntar dades de procedència diversa i discontinües en el temps (Lindahl i Hernroth 1983 i referències seves), amb el que es fa evident la necessitat d'una bona sèrie de dades per demostrar canvis interanuals en un àrea determinada.

Si en la badia dels Alfacs no s'han trobat canvis evidents de concentració de clorofil·la a al llarg de la dècada (Taula 2.11), en altres estuaris arreu del món sí que se n'han trobat, relacionats en la majoria dels casos amb canvis paral·lels en la disponibilitat dels nutrients a la columna d'aigua. En la Badia de Tomales es va detectar un increment significatiu de la clorofil·la a entre 1987 i 1996 de 0.5 $\text{mg Cl a m}^{-3} \text{ a}^{-1}$ ($n=48$, $p<0.05$, calculat a partir de dades de Smith i Hollibaugh 1997), que és obvi relacionar-lo amb l'increment estadísticament significatiu del coeficient d'extinció de la llum que s'ha trobat entre 1987 i 1996 (0.024 m^{-1} cada any, $n=49$, $p<0.01$, a partir de dades de la mateixa font). En el seu cas no han descrit tendències interanuals en les concentracions de nutrients, i una possible explicació és que el nitrogen, el nutrient limitant a la producció primària de la badia de Tomales, no entra majoritàriament amb

els aportats d'aigua dolça, com en la majoria d'estuaris d'arreu del món, sinó que és molt més important la font de procedència oceànica (Fourqurean *et al.* 1997).

El cas de la Badia de Chesapeake és el més clarament significatiu de tots i es troba, a més, recolzat per una extraordinàriament densa i extensa sèrie de dades de camp. La concentració de clorofil·la a en la capa superficial barrejada s'ha anat incrementant des de principis dels anys 50 fins a mitjans dels anys 90 en totes les zones del canal principal de la badia, mostrant els majors increments a la zona més propera a la comunicació amb mar obert (Harding 1994 i Harding i Perry 1997), que és precisament la que es troba en connexió amb els seus tres subestuaris James, York i Rappahannock (plana 322). També s'han detectat increments significatius en el nitrogen inorgànic dissolt i silicats per totes les zones en general al llarg de les mateixes 4 dècades, i el fòsfor ha mostrat una tendència inversa, major en les zones més properes a mar obert (Harding 1994). És curiós remarcar, per altra banda, que a causa de la manca d'una bona sèrie de dades d'extinció de llum a la columna d'aigua no han pogut mostrar en aquest treball l'esperable tendència a incrementar de forma paral·lela la turbolesa de l'aigua, com a mínim a causa d'aquest increment descrit de la clorofil·la a.

És que variables que tenen un alta variabilitat com la de la turbolesa de la columna d'aigua requereixen sèries de dades molt completes (que no existeixen a la badia dels Alfacs ni en moltes altres badies) per poder detectar els canvis que, per altra banda, serien esperables a la llum dels resultats d'altres variables o d'altres símptomes de l'ecosistema. Tan difícil sembla la documentació d'aquestes possibles tendències que no s'ha trobat referències explícites a canvis interanuals significatius de més de cinc anys de durada en la turbolesa de l'aigua, malgrat alguns resultats publicats permeten deduir-ne la seva existència. Aquest és el cas un cop més de la badia de Tomales, tal i com s'ha descrit anteriorment. En altres llocs com en un fiord tricapa estratificat de l'Skagerrak suec, per exemple, no s'han descrit canvis tan llargs, sinó tan sols una disminució en la transparència de l'aigua entre 1978 i 1981 inclosos (Rosenberg 1985), que va anar acompanyada d'increments extraordinaris de concentració de clorofil·la a en la capa eufòtica i episodis anòxics en la capa fonda. Però com ja s'ha comentat al Capítol 1, els fiords tricapa clàssics presenten períodes cíclics de renovació de la capa fonda de l'aigua que poden durar dècades, pel que calen sèries més llargues per poder parlar de tendències a llarg termini, més enllà de les de curta durada pròpies de la seva dinàmica habitual.

De l'oxigen dissolt no s'han trobat canvis significatius en la badia dels Alfacs a partir de les dades analitzades. Aquests canvis tampoc no es poden afirmar de forma categòrica en els ecosistemes aquàtics de forma general, llevat d'algunes descripcions parcials que es poden trobar a la literatura científica (veure annex "Augmenten les hipòxies?", plana 335).

Així, en molts estuaris tendeix a incrementar-se la disponibilitat de nutrients, i/o la concentració de clorofil·la a, i/o baixar la transparència de l'aigua. Pel contrari, a Alfacs no s'han pogut constatar aquests fets en l'horitzó parcial dels deu anys estudiats (o per falta de sèries de dades prou llargues i bones, o per que efectivament no s'hi donen). A més, el que podria haver canviat no sembla anar en la direcció d'afavorir les hipòxies (més força del vent màxim, menys diferències de salinitat entre superfície i fons, menys nitrat a l'aigua de la badia). Per altra banda, com els valors de finals dels anys noranta (nutrients, clorofil·la a, etc.) disten bastant dels llocs marcadament eutròfics, la diagnosi és que el sistema de la badia dels Alfacs es troba en un estat força saludable, més enllà de les hipòxies ocasionals descrites. Tot i això, canvis imprevistos (per exemple, l'aparició de les macroalgues) poden canviar l'escenari.

Bibliografia

- Anderson, P. J., *et al.*, 1997. "Declines of forage species in the Gulf of Alaska, 1972-1995, as an indicator of regime shift", a *Forage Fishes in Marine Ecosystems.*, 14,
- Austin, R. W., 1974. "The remote sensing of spectral irradiance from below the ocean surface", a *Optical aspects of oceanography*, 317-344. Academic Press, London.
- Bethoux, J. P., *et al.*, 1990. Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature.*, 347 (6294): 660-662.
- Bindoff, N. L. i Church, J. A., 1992. Warming of the water column in the southwest Pacific Ocean. *Nature.*, 357 (6373): 59-62.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1982. "A comparative analysis of nutrients and other factors influencing estuarine phytoplankton production", a *Estuarine comparisons*, 69-90. Academic Press, New York.
- Camp, J. i Delgado, M., 1987. Hidrografia de las bahías del Delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 51 (3): 351-369.
- Cloern, J. E., 1996. Phytoplankton bloom dynamics in coastal ecosystems: A review with some general lessons from sustained investigation of San Francisco Bay, California. *Rev. Geophys.*, 34 (2): 127-168.
- Cole, B. E., 1989. Temporal and spatial patterns of phytoplankton production in Tomales Bay, California, USA. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 28 (1): 103-115.
- Cole, B. E. i Cloern, J. E., 1984. Significance of biomass and light availability to phytoplankton productivity in San Francisco Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 17 (1): 15-24.
- Curtis, S. i Hastenrath, S., 1999. Long-Term Trends and Forcing Mechanisms of Circulation and Climate in the Equatorial Pacific. *Journal of Climate*, 12 (4): 1134-1144.
- Degterev, A. K., 2000. Assessment of temperature rise in an active layer of the Black Sea in 1985-1997.
- Duarte, C. M., 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41 87-112.

- Dulcic, J., *et al.*, 1999. Information on the Adriatic ichthyofauna - effect of water warming? *Acta Adriatica*, 40 (2): 33-43.
- Fisher, T. R., *et al.*, 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 82 (1): 51-63.
- Fourqurean, J. W., *et al.*, 1997. Spatial and temporal variation in C:N:P ratios, delta ¹⁵N and delta ¹³C of eelgrass *Zostera marina* as indicators of ecosystem processes, Tomales Bay, California, USA. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 157 147-157.
- Francour, P., *et al.*, 1994. Are the Mediterranean waters becoming warmer? Information from biological indicators. *Mar. Pollut. Bull.*, 28 (9): 523-526.
- Gibbs, M. T., *et al.*, 2000. Maintenance of Near-Surface Stratification in Doubtful Sound, a New Zealand Fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51 (6): 683-704.
- Gordon, J. I., 1969. Quoted by Austin (1974):
- Grasshoff, K., *et al.*, 1983. Methods of seawater analysis: 419.
- Harding, L. W., Jr., 1994. Long-term trends in the distribution of phytoplankton in Chesapeake Bay: Roles of light, nutrients and streamflow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 104 (3): 267-291.
- Harding, L. W., Jr. i Perry, E. S., 1997. Long-term increase of phytoplankton biomass in Chesapeake Bay, 1950-1994. *Marine Ecology Progress Series*, 157 39-52.
- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Ibáñez, C., *et al.*, 1999. El delta del Ebro, un sistema amenazado. *Nueva Cultura del Agua*, 6: 109.
- Ibáñez, C., *et al.*, 1995. "The combined impacts of river regulation and eutrophication on the dynamics of the salt wedge and ecology of the lower Ebro River", a *Ecological Basis for River Management*, 105-114. John Wiley & Sons, Chichester (Regne Unit).
- Jørgensen, S. E., 1994. Fundamentals of ecological modelling. *Developments in Environmental Modelling*, 19: 628.
- Kirk, J. T. O., 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems:

- Kromkamp, J. i Peene, J., 1995. Possibility of net phytoplankton primary production in the turbid Schelde Estuary (SW Netherlands). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 121 249-259.
- Largier, J. L., 1986. Structure and mixing in the Palmiet Estuary, South Africa. *S. Afr. J. Mar. Sci. S. Afr. Tydskr. Seewet.*, 4 139-152.
- Largier, J. L., *et al.*, 1997. Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45 (6): 789-797.
- Lefevre, D., *et al.*, 1994. The temperature response of gross and net community production and respiration in time-varying assemblages of temperate marine micro-plankton. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 184 (2): 201-215.
- Lindahl, O. i Hernroth, L., 1983. Phyto-zooplankton community in coastal waters of western Sweden- an ecosystem off balance? *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 10 (2): 119-126.
- Maddock, L. i Swann, C. L., 1977. A statistical analysis of some trends in sea temperature and climate in the Plymouth area in the last 70 years. *J Mar Biol Assoc U K*, 57 (2): 317-338.
- Malone, T. C., *et al.*, 1996. Scales of nutrient-limited phytoplankton productivity in Chesapeake Bay. *Estuaries*, 19 (2B): 371-385.
- Margalef, R., 1974. *Ecología*: 951.
- Marsh, J. A. J., *et al.*, 1986. Effects of Temperature on Photosynthesis and Respiration in Eelgrass *Zostera-Marina*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 101 (3): 257-268.
- Matthaeus, W. i International Counc. for the Exploration of the Sea, C. H. C., 1995. "Natural variations and human impacts reflected in long-term changes in the Baltic deep water", a *Copenhagen Denmark*,
- Morrison, G., *et al.*, 1997. Estimated Nitrogen Fluxes and Nitrogen-Chlorophyll Relationships in Tampa Bay, 1985-1994. *Proceedings of the Tampa Bay Area Scientific Information Symposium*, 3:
- Officer, C. B., 1980. "Box model revisited", a *Estuarine and wetland processes: with emphasis on modelling*, 65-114. Plenum Press, New York.

- Officer, C. B., 1983. "Physics of estuarine circulation", a *Estuaries and enclosed seas*, 26, 15-41. Elsevier, Amsterdam.
- Olivos, A., 2000. Nutrientes inorgánicos disueltos en aguas litorales próximas al Mar Catalán. Ph.D., 134 pp., *Departament d'Ecologia*, Universitat de Barcelona.
- Pérez, M., *et al.*, 1991. Phosphorus limitation of *Cymodocea nodosa* growth. *Mar. Biol.*, 109 129-133.
- Rosenberg, R., 1985. Eutrophication - the future marine coastal nuisance? *Marine Pollution Bulletin*, 16 227-231.
- SAS Institute, I., 1990. SAS/STAT user's guide, Version 6, 2:
- Smith, S. V. i Hollibaugh, J. T., 1997. Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecological Monographs*, 67 (4): 509-533.
- Smith, S. V., *et al.*, 1987. Stoichiometry of C, N, P, and Si fluxes in a temperate-climate embayment. *J. Mar. Res.*, 45 (2): 427-460.
- StatSoft, I., 1999. STATISTICA for Windows (computer program manual):
- Thomann, R. V. i Mueller, J. A., 1987. "Eutrophication", a *Principles of surface water quality modelling and control*, 385-493. Harper & Row, New York.
- Tilzer, M. M. i Dubinsky, Z., 1987. Effects of Temperature and Day Length on the Mass Balance of Antarctic Phytoplankton. *Polar Biology*, 7 (1): 35-42.
- Underwood, G. J. C. i Kromkamp, J., 1999. "Primary production by Phytoplankton and Microphytobenthos in Estuaries", a *Estuaries*, 29, 306. Academic Press, London.
- Valiela, I., 1995. *Marine Ecological Processes*:
- Valiela, I., *et al.*, 1997. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnol. Oceanogr.*, 42 (5, part 2): 1105-1118.
- van Spaendonk, J. C. M., *et al.*, 1993. Primary production of phytoplankton in a turbid coastal plain estuary, the Westerschelde (The Netherlands). *Neth. J. Sea Res.*, 31 267-292.

- Vergara, J. J., *et al.*, 1997. Seasonal variation of photosynthetic performance and light attenuation in Ulva canopies from Palmones River estuary. *Journal of Phycology*, 33 (5): 773-779.
- Vidal, M., 1991. Estudios sobre la dinámica de nutrientes en sistemas estuáricos: flujos de sedimento-agua de nutrientes y oxígeno. Ph. D., 305 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Wang, P. F., *et al.*, 1999. Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49 (1): 1-20.
- Wetsteyn, L. P. M. J. i Kromkamp, J. C., 1994. "Turbidity, nutrients and phytoplankton primary production in the Oosterschelde (The Netherlands) before, during and after a large-scale coastal engineering project (1980-1990)", a *The Oosterschelde Estuary the Netherlands: A Case Study of a Changing Ecosystem.*, 61-78.
- Yentsch, C. S. i Menzel, D. W., 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research*, 10 221-231.
- Zhou, Y., *et al.*, 1996. Evolution features of global SST over the past hundred years. *J. Trop. Meteorol. Redai Qixiang*, 12 (1): 85-90.

Capítol 3. Descripció d'un període d'hipòxia

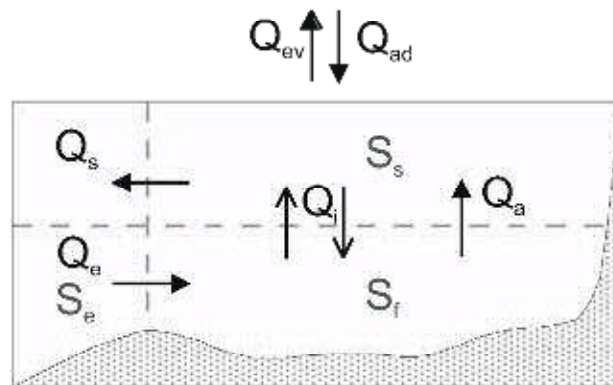
Capítol 3 . Descripció d'un període d'hipòxia

Introducció

Per què es produeixi una davallada d'oxigen prou important, és condició necessària que la demanda (essencialment biològica) d'oxigen sigui superior a la suma de producció i transport net. En molts casos a les capes fondes dels estuaris, el consum biològic supera clarament a la producció, i l'oxigenació es produeix per processos físics. (Officer *et al.* 1984). Els processos de transport són, doncs, mecanismes clau en els balanços d'oxigen, i en poden portar tant a través d'intrusions d'aigua salada de l'exterior, o bé per aportes de la capa superficial, generalment modulats per l'acció del vent (Diaz i Rosenberg 1995, Jørgensen i Richardson 1996). Aquest transport d'oxigen es pot dividir en "fluxos advectionals" (amb transport net de massa d'aigua), i fluxos no advectionals (sense transport net de massa d'aigua), altrament dits, "fluxos d'intercanvi" (Officer 1980).

El transport advectional s'ha mostrat essencial per a la dinàmica d'oxigen a badies estuarianes (p.e., Fujiwara *et al.* 2002), i molt especialment als fiords (Saalen 1967, Stigebrandt 2001, Figura 1.1), en els quals s'han descrit molts episodis d'esgotament d'oxigen dissolt (nombreuses cites a Richards 1965, Saalen 1967, Gade i Edwards 1980, Rosenberg 1985, Gray *et al.* 1988), relacionats amb poc transport advectional en la capa de fons.

El flux no advectional també pot ser una font important d'oxigen per les capes fondes. En aquest sentit, cal notar que si bé les reduccions d'aports d'aigua dolça a una badia fan reduir el flux advectional, per altra banda també permeten un increment del flux no advectional, en haver una menor diferència de densitat entre la capa superficial i la fonda, que fa més fàcil la barreja vertical. Això es pot observar a les equacions senzilles d'estat estacionari per a un model d'estuari de només dues caixes, connectat amb mar obert (Figura 3.1). Si disminueix l'entrada d'aigua dolça pels canals (Q_{e0}), llavors disminuirà el cabal de sortida (Q_s), que a la vegada farà disminuir el cabal d'entrada (Q_e , a causa de la reducció de circulació estuariana positiva, veure Capítol 1 per a més detalls), i disminuirà la salinitat superficial (S_s). El flux no advectional (en aquest cas, representat pel flux d'intercanvi, Q) depèn, a més de Q_e , inversament de la diferència ($S_r - S_s$), pel que tot i que disminueixi el flux advectional (Q_e), el flux d'intercanvi tendirà a mantenir-se per la disminució de S_s que afecta al denominador de l'expressió que serveix per avaluar Q . D'aquí que l'efecte dels aportes d'aigua dolça sobre la renovació de la capa fonda sigui doble: potencien el flux advectional però fan disminuir el flux no advectional. I el contrari si augmenten els aportes d'aigua dolça, com s'ha descrit amb les crescudes primaverals dels rius tant en alguns estuaris mediterranis (Hearn i Robson 2001) com a d'altres estuaris (Officer *et al.* 1984, Seliger i Boggs 1988, Kemp *et al.* 1992). També s'ha trobat una certa relació entre les pluges estiuenques a la zona mediterrània i la posterior aparició d'hipòxies en sistemes estuaris costaners (Harzallah i Chapelle 2002), malgrat que, en aquest cas, l'efecte d'incrementar l'estratificació coincideix amb un aport important de nutrients, també mediat per les pluges.



$$\left. \begin{aligned}
 Q_s &= Q_a + (Q_{ad} - Q_{ev}) \\
 Q_a &= Q_e \\
 Q_e S_e &= Q_a S_f + Q_i S_f - Q_i S_s
 \end{aligned} \right\} Q_i = Q_e \frac{S_e - S_f}{S_f - S_s}$$

Figura 3.1 Esquema de l'estructura simplificada d'un estuari amb dues capes (caixes negres), que es mantenen en estat estacionari, rebent aportos d'aigua dolça de l'exterior i aigua salada de mar obert (veure text per més detalls). Notació: Q_e = Cabal d'aigua d'entrada, Q_a = Cabal ascendent, Q_i = Cabal d'intercanvi, Q_{ad} = Cabal d'aigua dolça, Q_{ev} = Cabal evaporat, S_e = Salinitat d'entrada, S_f = Salinitat del fons, S_s = Salinitat superficial.

Sovint però, es dona una reducció en part dels fluxos advectionals i no advectionals verticals (a través de la pinoquina), i es descriu generalment l'estratificació vertical de la columna d'aigua com a condició necessària per a la hipòxia (Swanson i Sindermann 1979, Officer *et al.* 1984, Stanley i Nixon 1992, Turner *et al.* 1987, Weigelt 1990, Borum 1996, Munekage *et al.* 1991, Munekage 1992, Hearn i Robson 2001, Buzzelli *et al.* 2002)

A demés dels fluxos d'aigua, existeixen altres condicions de contorn que influïen sobre els balanços d'oxigen i que per tant poden ser rellevants per regular les hipòxies. Entre elles es troba la radiació, la temperatura, la pressió atmosfèrica, i per descomptat, la velocitat del vent. Cal fixar-se en el conjunt de factors que hi intervenen sobre la dinàmica d'oxigen, atès que la coexistència de petits canvis d'alguns d'ells pot ser determinant per generar, mantenir o finalitzar les deficiències d'oxigen dissolt a la capa de fons de la columna d'aigua.

Per això, una aproximació potencialment útil per comprendre millor els factors determinants d'un fenomen hipòxic és la descripció acurada i a una escala de temps prou fina d'un d'aquests fenòmens. Aquesta aproximació no és gaire freqüent a la literatura, atesa la dificultat de captar adequadament la complexitat d'aquests processos amb mostres allunyats en el temps o esporàdics (Taylor i Howes 1994). A la badia dels Alfacs, els casos previs de les hipòxies millor documentades corresponen als anys 1990 i 1991, però en cap dels dos casos hi han dades de prou resolució que incloguin l'oxigen dissolt al llarg de diversos dies del fenomen. Presentem, doncs, en aquest capítol els resultats

obtinguts sobre diverses variables durant el fenomen hipòxic, amb l'objectiu de documentar detalladament les condicions en que es produeixen aquestes davallades d'oxigen.

Metodologia

Es va dissenyar una estratègia d'obtenció de dades que incloïa:

- un mostreig discret en l'espai i el temps
- un mostreig continu en el temps
- un mostreig puntual en el temps i extensiu en l'espai

Per últim es va fer servir dades d'altres anys per comparació.

Mostreig discret en l'espai i el temps

El mostreig es va dur a terme durant un període hipòxic que va tenir lloc a finals d'estiu de 1997, concretament entre el 17 de setembre i el 9 d'octubre, amb un últim mostreig el 22 d'octubre. Durant aquest període, es van mesurar perfils en fondària de salinitat, temperatura i oxigen dissolt amb freqüència setmanal a les estacions de mostreig *Exterior*, *Boca*, *Mig* i *Cua* (Figura 3.2). El salinòmetre emprat va ser un WTW LF196, i l'oxímetre polarogràfic de membrana, un WTW oxi196, amb el que es va enregistrar també la temperatura.

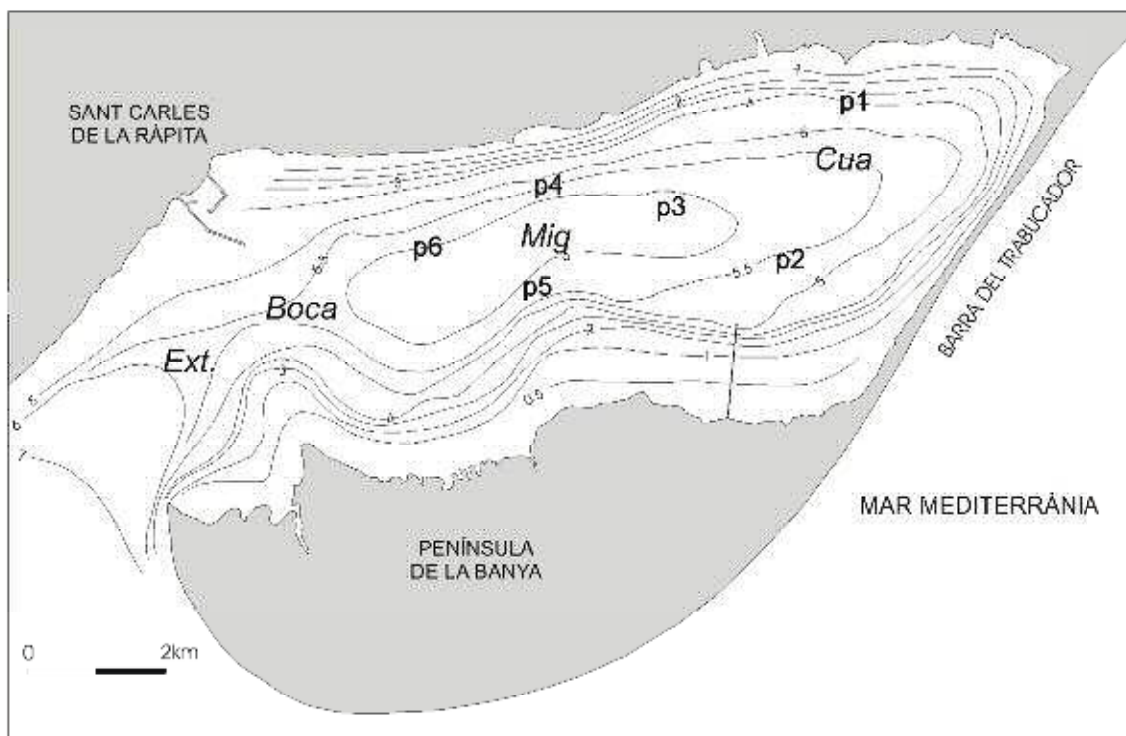


Figura 3.2 Punts de mostreig del mapa d'oxigen de la badia dels Alfacs (25/09/97), representats pels símbols p1 a p6, més els de les estacions *Exterior* (*Ext.*), *Boca*, *Mig* i *Cua*.

Mostreig continu en el temps

Al fons de l'estació *Mig* es va mesurar la salinitat, temperatura, oxigen dissolt i pressió hidrostàtica, amb freqüència d'una mesura cada 10 minuts, entre el 16 i el 21 de setembre. Això es va fer amb una sonda multiparamètrica que incloïa un sensor d'oxigen de micropolsos, Ysi 6000. Aquest model de

sonda ha estat provat en diverses condicions experimentals, i la resposta del seu sensor de micropolsos d'oxigen ja ha estat analitzada per altres investigadors donant resultats satisfactoris (Kester i Magnuson 1994, Kester *et al.* 1996). En el nostre cas, la sonda va ser col·locada lligada a un pes mort del fons de tal manera que els sensors de la sonda quedaven a 40 cm per sobre de la superfície del sediment. Per problemes tècnics, la sonda només va enregistrar dades de 4 dies de mostreig. Finalment, es van recopilar les dades meteorològiques horàries (per les mateixes dates del registre de la sonda) de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP, excepte les de pressió atmosfèrica que procedeixen d'Amposta-DMA (veure Capítol 1, plana 30 per a més detalls sobre aquestes estacions meteorològiques). Les hores del dia s'han expressat en hores solars.

La pressió hidrostàtica de la sonda s'ha assimilat a l'alçada de la columna d'aigua, un cop corregida per la pressió atmosfèrica (veure Capítol 1, plana 31, per més detalls). Com el registre de pressió atmosfèrica té dades horàries i el de la sonda dades cada 10 minuts, la variable "alçada de la columna d'aigua" no mostra tota el conjunt de la sèrie. Per aquesta raó s'ha representat la pressió hidrostàtica sense corregir (amb dades cada 10 minuts) amb el conjunt de variables enregistrades per la sonda, i en un gràfic a part, la sèrie promitjada en intervals de 60 minuts i transformada en l'alçada de la columna d'aigua.

S'ha calculat la sigma-t (σ_t) de cada mesura restant 1000 del valor de densitat, calculada a partir de l'equació d'estat de l'aigua de mar, segons procediments estàndard (UNESCO 1981)

Per altra banda s'han fet servir aquí dades de resultats ja mostrats en capítols precedents, corresponents a valors setmanals o diaris al llarg de l'any, de velocitat del vent, salinitat, temperatura i concentració d'oxigen dissolt de la capa de fons (Capítol 1, Metodologia), així com diferència de sigma_T, a partir de les dades anteriors. De forma similar s'han fet servir les mesures en continu cada 10 minuts del correntímetre situat a l'entrada de la badia entre el 12 de setembre de 1997 i el 12 de novembre de 1997, per tal de calcular el flux net residual diari (expressat en milions de metres cúbics per dia, amb valors positius d'entrada a la badia i negatius de sortida; per més detalls sobre les dades d'aquest aparell, veure Metodologia del Capítol 1, plana 29).

Mostreig puntual en el temps i extensiu en l'espai

Per tal de conèixer la superfície de la badia afectada per la hipòxia es van realitzar deu perfils en fondària mesurats a 0.1 m, 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m i fons, entre el dia 25 i el 30 de setembre, distribuïts per la badia, per abastar el màxim de superfície possible (p1 a p6 més les 4 estacions de mostreig habituals, Figura 3.2).

Per la representació gràfica dels transectes de perfils en fondària, s'han realitzat interpolacions pels mètodes de Kriging i triangulació.

Altres dades

Els gràfics fets servir a la discussió de les hipòxies corresponent als anys 1990 i 1991 procedeixen de Camp 1994), i els de l'evolució setmanal de la salinitat, temperatura i oxigen dissolt al punt central el 1991 són d'elaboració pròpia a partir de dades del mostreig setmanal realitzat de forma rutinària per tècnics del Centre Nacional d'Aqüicultura, IRTA, localitzat al municipi de Sant Carles de la Ràpita.

Resultats

Evolució temporal de l'oxigen dissolt i de l'estructura hidrogràfica

En iniciar el mostreig el dia 17 de setembre de 1997, l'aigua del fons es trobava al voltant de 50 % de saturació d'oxigen, però la setmana següent ja es va mesurar el valor més baix del període (14 %, 0,9 mg O₂ l⁻¹), tot i que en setmanes posteriors la concentració d'oxigen es va recuperar (Figura 3.3a - e).

Pel que fa a l'estructura hidrogràfica de la badia, val a dir que la primera setmana es va trobar a l'últim metre per sobre del fons una capa d'aigua més salada que la resta (amb més de 37 psu front les 35 psu superficials i les 36 psu de l'exterior, Figura 3.4a), amb un 60% aproximat de saturació d'O₂ (Figura 3.3a). Una setmana més tard, la salinitat del fons de la badia va disminuir a 36.5 psu mentre que la de l'exterior era de 37.1 psu (Figura 3.4b). L'oxigen es va trobar en aquells moments en els valors més baixos, arribant a 14% de saturació al fons de l'estació *Cua* (Figura 3.3b). La setmana posterior va aparèixer per primera vegada una certa continuïtat entre l'aigua més fonda de l'interior de la badia i la de l'exterior, amb salinitats similars (que a la vegada eren totes elles superiors a 36.5 psu durant els primers 7 quilòmetres de recorregut d'oest a est; Figura 3.4c). La concentració d'oxigen encara va manifestar, però, un gradient vertical important, si bé els valors mínims no van baixar del 40% (1 d'octubre, Figura 3.3c). Per últim, cal fixar-se que el 9 d'octubre es va tornar a observar una massa d'aigua exterior de salinitat prou superior a la de la capa fonda de la badia, indicant de nou una certa discontinuïtat entre ambdues masses d'aigua, però en canvi, l'estratificació de la columna d'aigua va ser molt minsa llavors, a diferència de les setmanes anteriors (Figura 3.6d). L'oxigen va recuperar valors de saturació propers al 90% ja en tota la capa inferior, pel que es va donar per finalitzat l'episodi hipòxic (Figura 3.3d). Dues setmanes més tard, l'oxigen del fons es trobava entre el 90 i el 70 %, observant-se de nou una massa d'aigua de més de 37 psu a la part inferior de l'estació *Boca*. Malgrat això representava incrementar de nou la densitat de l'aigua fonda (més de 26 de σ_t), i per tant, disminuir potencialment la seva renovació (com més gradient de densitat en fondària, més difícil que es produeixi barreja vertical), aquesta situació no va durar gaire i la concentració d'oxigen al fons va anar augmentant progressivament en setmanes posteriors (Figura 2.12c, plana 85).

Cal recordar que la distribució de salinitats (Figura 3.4a-e) és més important que no pas la de temperatures (Figura 3.5a-e) com a determinant de l'estructura de densitats (Figura 3.6a-e).

Registres en continu

La salinitat de la massa d'aigua just en contacte amb el fons al punt central va ser de 38 psu el 16 de setembre de 1997 (Figura 3.7a), prop de 2 psu superior a la pròpia de mar obert en aquestes mateixes dates (Figura 3.3a). La salinitat del fons va disminuir progressivament 0.1 psu d⁻¹ fins la matinada del 19 de setembre en que va manifestar oscil·lacions sobtades notables de 0.1 psu d'amplitud i de prop de 3h de període. A partir del migdia van desaparèixer les oscil·lacions i la

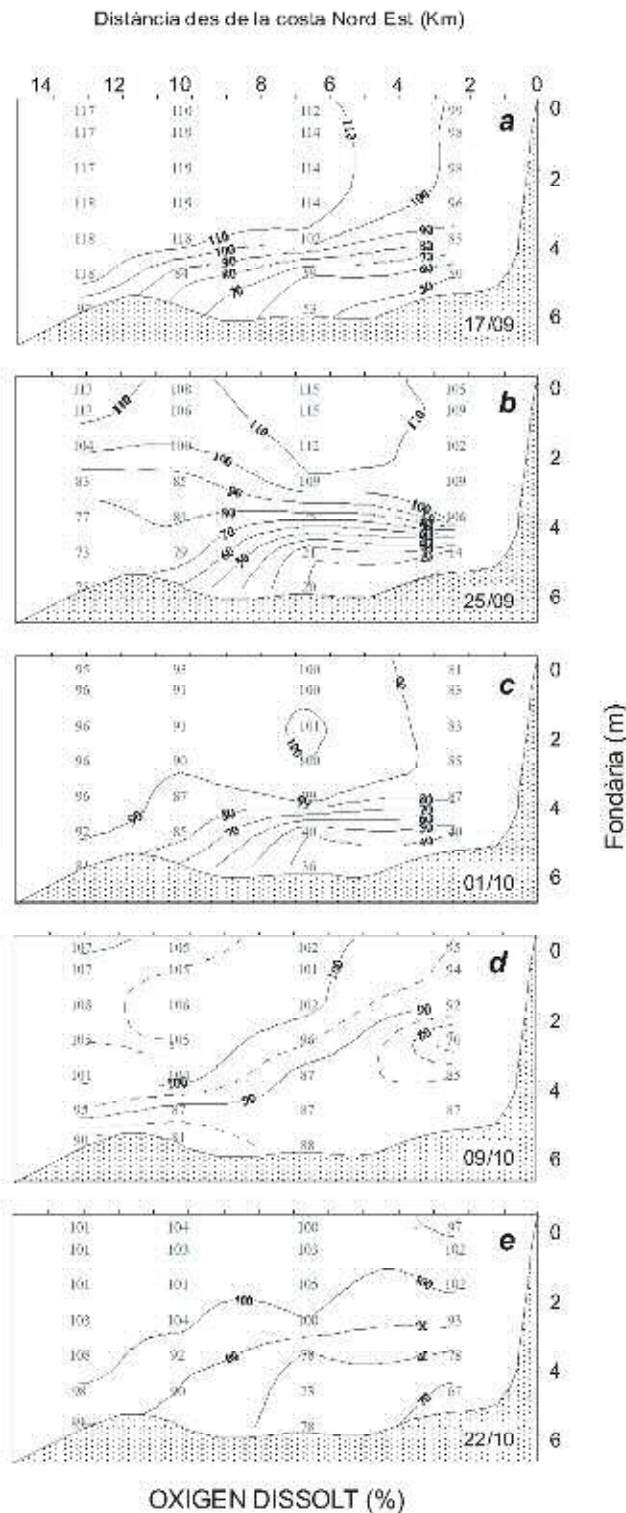


Figura 3.3 Evolució dels perfils d'oxigen dissolt (O_2 , en %) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).

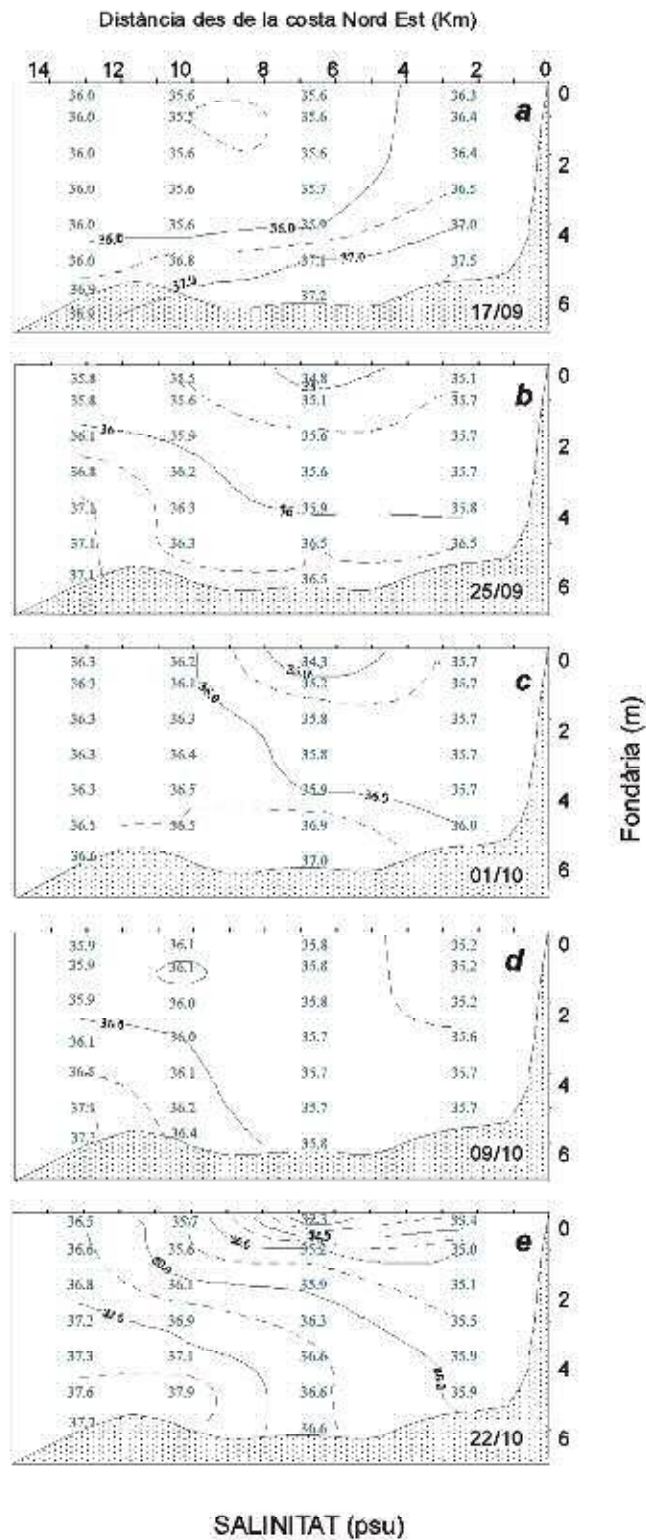


Figura 3.4 Evolució dels perfils de Salinitat (S) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).

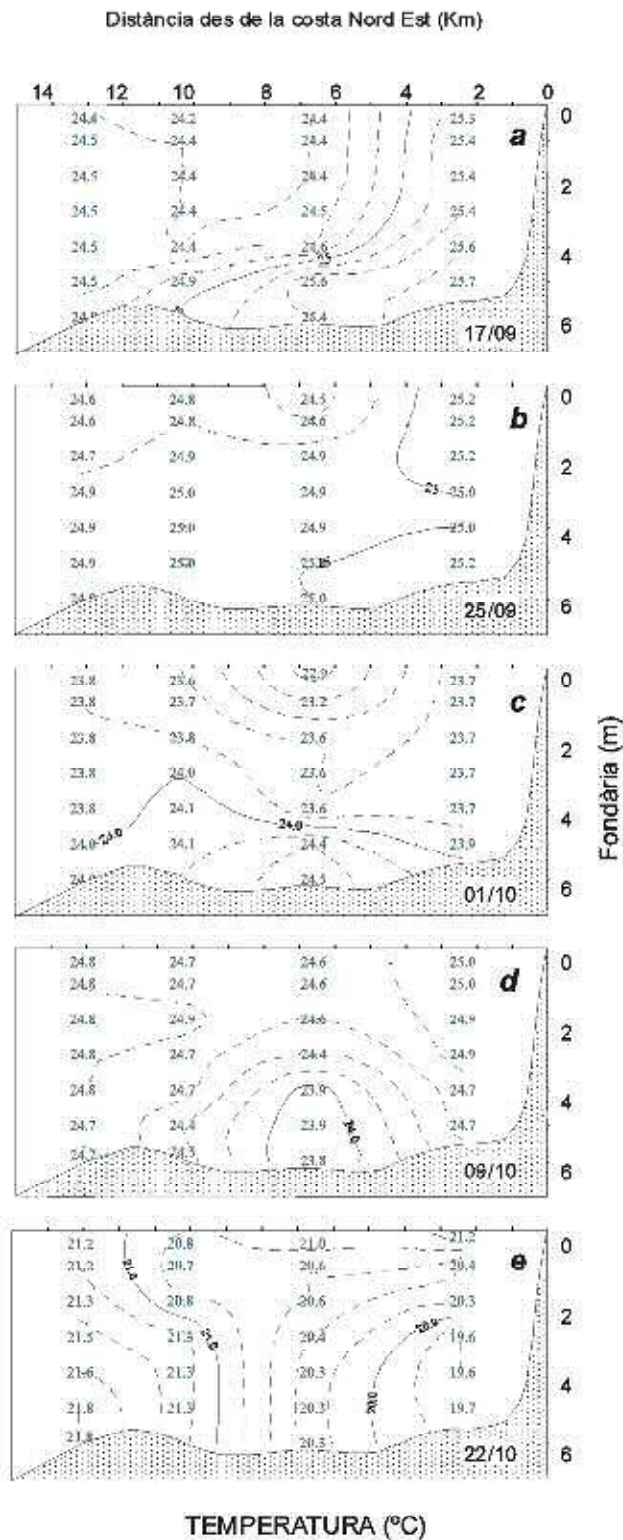


Figura 3.5 Evolució dels perfils de Temperatura (T, en °C) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/10/97).

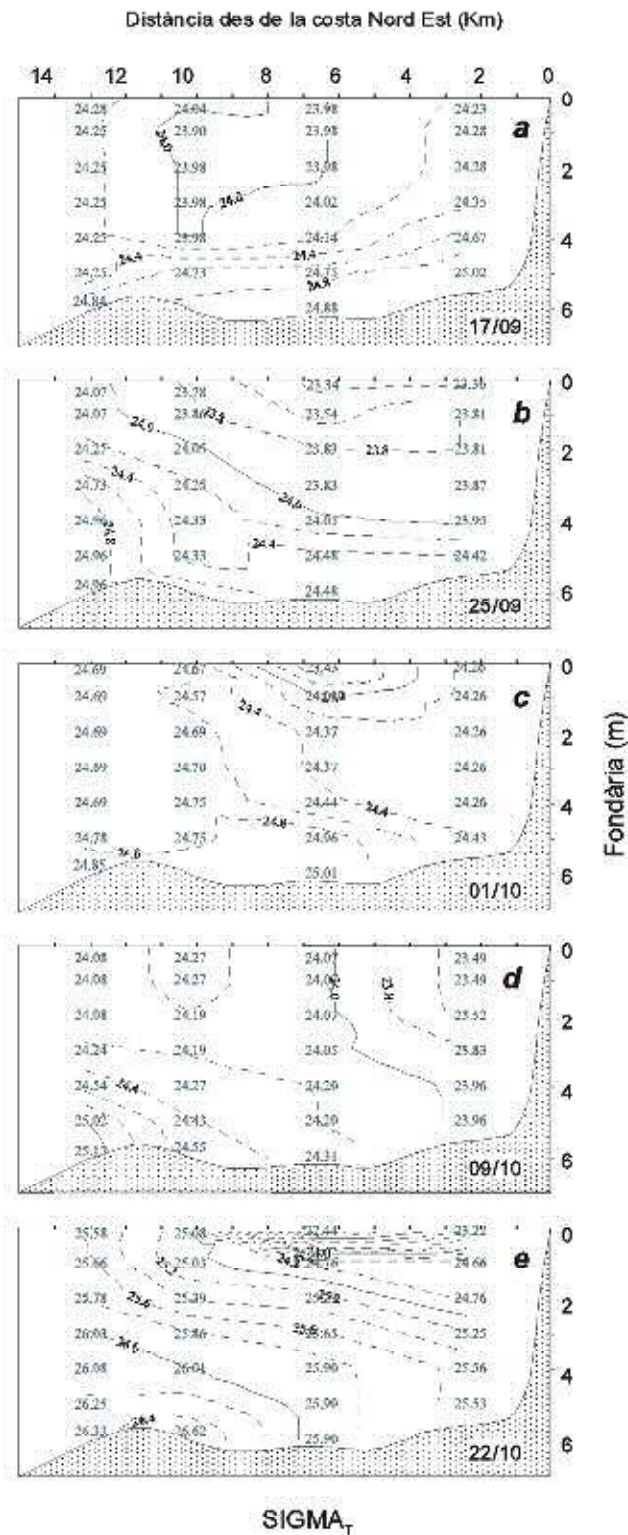


Figura 3.6 Evolució dels perfils de sigma_T a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/10/97).

salinitat va continuar descendant progressivament però més de pressa, fins que passada la mitjanit entre el 19 i 20 de setembre la salinitat va tornar a oscil·lar prop de 0.1 unitats d'amplitud al voltant dels 37.4 psu. La temperatura va seguir una evolució similar a la salinitat (Figura 3.7b), mentre que l'oxigen dissolt (Figura 3.7c) va mostrar un cicle diari a causa de l'alternança producció/respiració. El balanç diari va ser negatiu, amb una disminució diària de $0.4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. El 20 de setembre no va mostrar la davallada característica de les primeres 12 hores dels altres dies de mostreig sinó que va mantenir els seus valors amb oscil·lacions de menys de 0.3 mg l^{-1} . Cal notar que mentre van existir unes 6 h de decalatge entre el màxim d'oxigen dissolt i el moment de major elevació del sol, al migdia solar, la seva velocitat de canvi horària va mostrar els màxims molt propers al migdia solar (Figura 3.7d). L'alçada de la columna d'aigua va oscil·lar entre 5.9 i 6.2 m, aproximadament (Figura 3.7e), mostrant la influència de la marea i de la ona estacionària de prop de 3h de període descrita a la badia (Camp 1994).

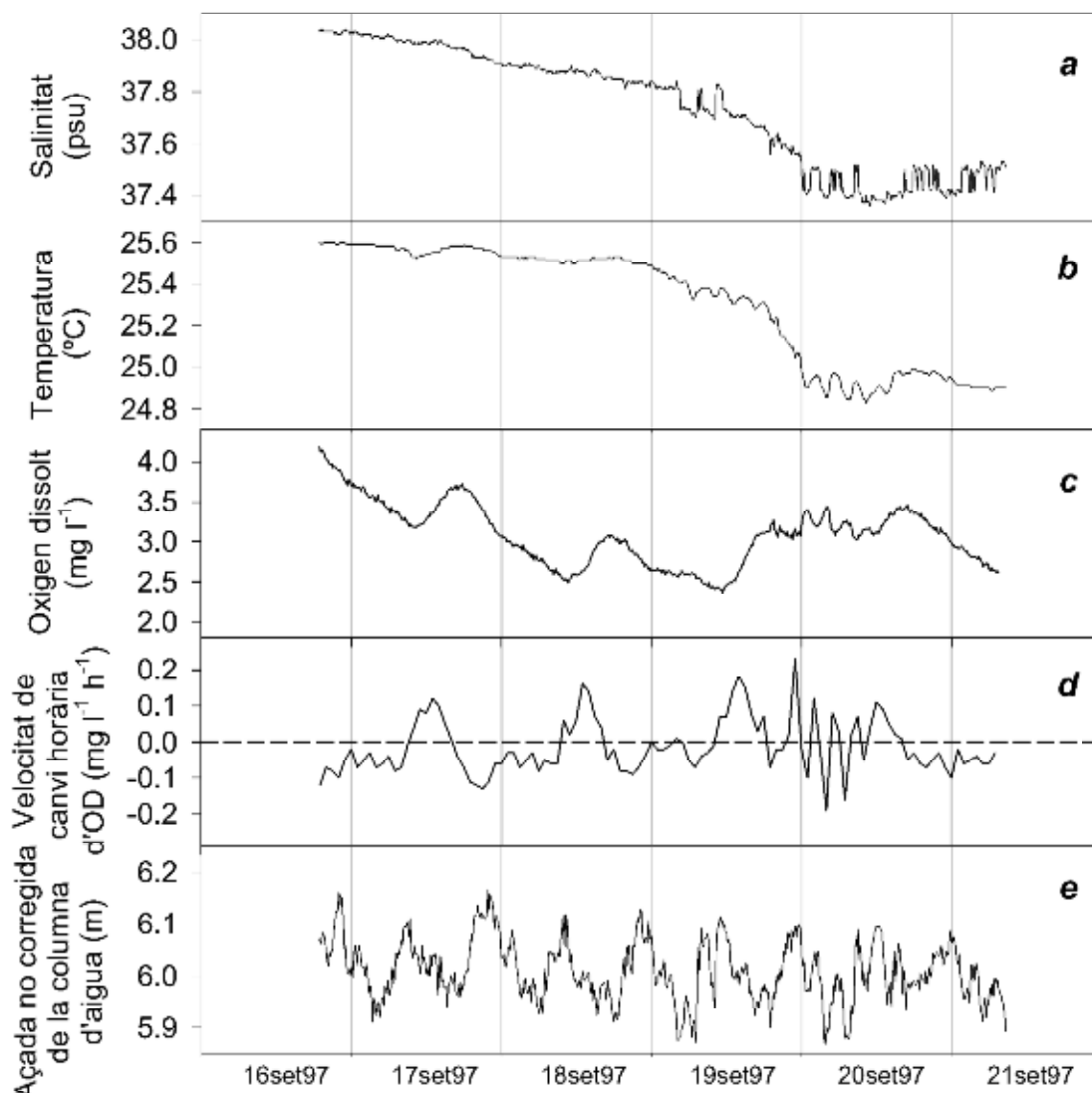


Figura 3.7 Evolució horària, en el punt central de la badia, de: (a) salinitat, (b) temperatura, (c) oxigen dissolt, (d) velocitat de canvi d' O_2 , i (e) alçada no corregida de la columna d'aigua (a partir de registre de pressió hidrostàtica, sense corregir per la pressió atmosfèrica; veure Figura 3.9 per a la sèrie corregida).

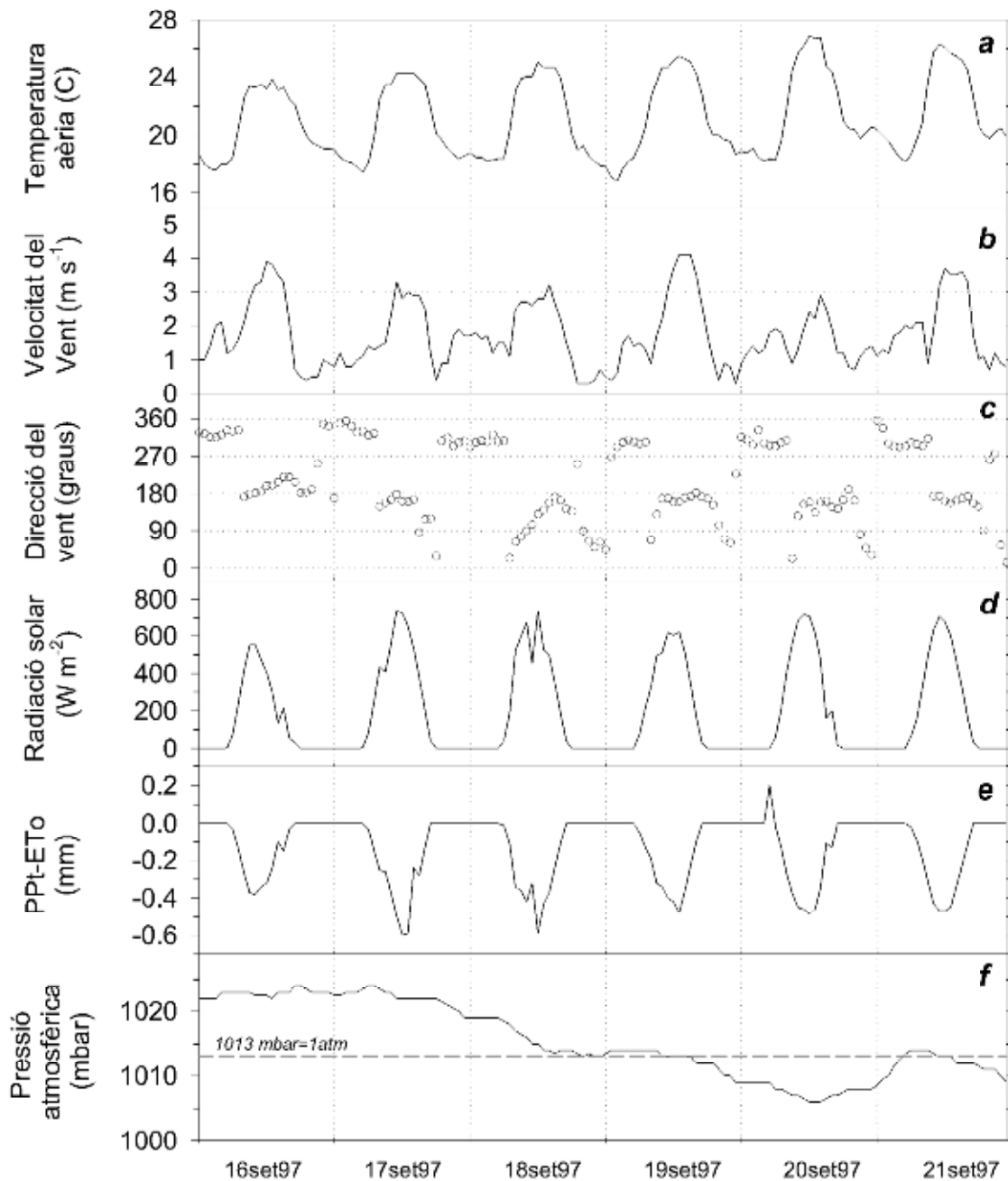


Figura 3.8 Evolució horària de les variables meteorològiques entre el 16 i el 21 de setembre de 1997: (a) Temperatura aèria ($^{\circ}\text{C}$), (b) Velocitat del vent (m s^{-1}), (c) Direcció de procedència del vent (graus de desviació en sentit horari respecte el Nord), (e) Radiació Solar (W m^{-2}), Balanç hídric per via atmosfèrica, PPT-ETo (mm), Pressió atmosfèrica (mbar). Totes les dades procedeixen de registres horaris de l'estació meteorològica Amposta-DARP, excepte les de Pressió Atmosfèrica, que són cada 30' de l'estació Amposta-DMA.

La temperatura aèria va mostrar una lleugera pujada en els seus valors màxims diaris al llarg dels 6 dies, i en general es va moure entre 17 i 27 $^{\circ}\text{C}$ (Figura 3.8a). Els vent va bufar de Terrals (Nord-Oest, direcció propera als 330°) durant la nit amb velocitats entre els 0.5 i 2 m s^{-1} ; i de dia va procedir de Garbí o Migjorn (component sud, direcció propera als 180°), abastant valors màxims entre 3 i 4 m s^{-1} (Figura 3.8b i c). El dia 20 de setembre va presentar unes velocitats màximes inferiors als 2 m s^{-1} . La radiació solar va arribar a prop dels 800 W m^{-2} al migdia (Figura 3.8d) mentre que el balanç hídric per

via atmosfèrica va ser de prop de -0.5 a -0.6 mm h⁻¹ d'aigua durant el dia, i tan sols va rebre la influència d'un xàfec la matinada del dia 20, amb prop de 0.2 mm h⁻¹ (Figura 3.8e). La pressió atmosfèrica va ser alta els primers dies del registre (ca. 1024 mbar), i va canviar cap a baixes pressions a partir del migdia del 19 de setembre, mostrant les mínimes absolutes del registre el dia 20 que van durar aquell sol dia (Figura 3.8f).

Un cop corregit el registre de fondària de la sonda per la pressió atmosfèrica, s'observa com al llarg dels quatre dies el nivell de la columna d'aigua va disminuir per causes alienes a la pressió atmosfèrica ("sèrie corregida", Figura 3.9), però l'alçada de la columna d'aigua deduïda del sensor de pressió sense corregir no ho manifesta així ("sèrie no corregida", Figura 3.9), per veure's emmascarada per la disminució de la pressió atmosfèrica al llarg dels 4 dies (Figura 3.8f). L'alta pressió dels primers dies mantenia la columna d'aigua més baixa, mentre que la menor pressió atmosfèrica dels darrers dies produïa l'efecte contrari.

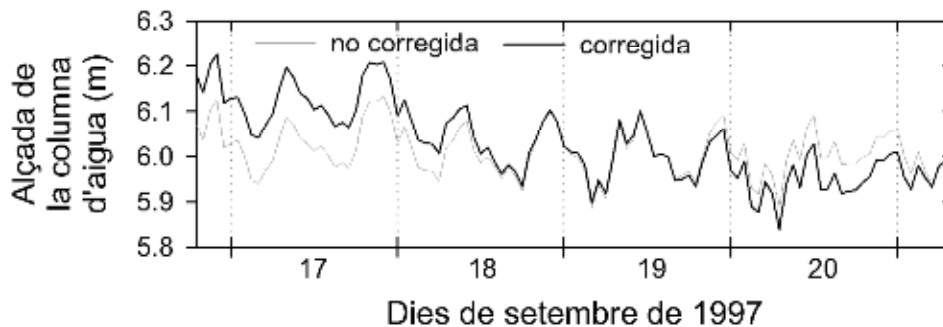


Figura 3.9 Correcció de l'alçada de la columna d'aigua del registre baromètric de la sonda multiparamètrica submergida a partir del registre de Pressió atmosfèrica de l'estació meteorològica Amposta-DMA. S'ha assumit la relació de canvi de +1mbar = -1 cm. (veure text per a més detalls). S'ha d'entendre l'alçada corregida de la columna d'aigua com l'alçada que s'hauria observat si no s'hi haguessin donat canvis de pressió atmosfèrica.

Extensió espacial de la hipòxia

A finals de setembre de 1997, l'aigua es va trobar lleugerament per sobre de saturació en superfície, mantenint-se aquesta fins els 2 m de fondària a tota la badia (Figura 3.10a). En arribar als 4 m de fondària, la concentració d'oxigen era del 40% de saturació en la meitat oest de la badia, mentre que la meitat oriental es trobava per sobre del 100% de saturació a la mateixa fondària (Figura 3.10b). Als 5 m, la capa sobresaturada ja havia desaparegut i els valors de la badia es trobaven en general entre el 80 i el 25 % de saturació d'O₂ (Figura 3.10c), trobant mínims del 20 % al centre de la badia, en la secció de fondària superior als 6 m (Figura 3.10d).

Els valors de concentració d'oxigen immediatament per sobre del fons (a la fondària que correspongui en cada lloc) van mostrar mínims de 14 i 20% en termes de saturació (Figura 3.11), ó 0.9 i 1.3 mg l⁻¹, respectivament, en termes de concentració absoluta.

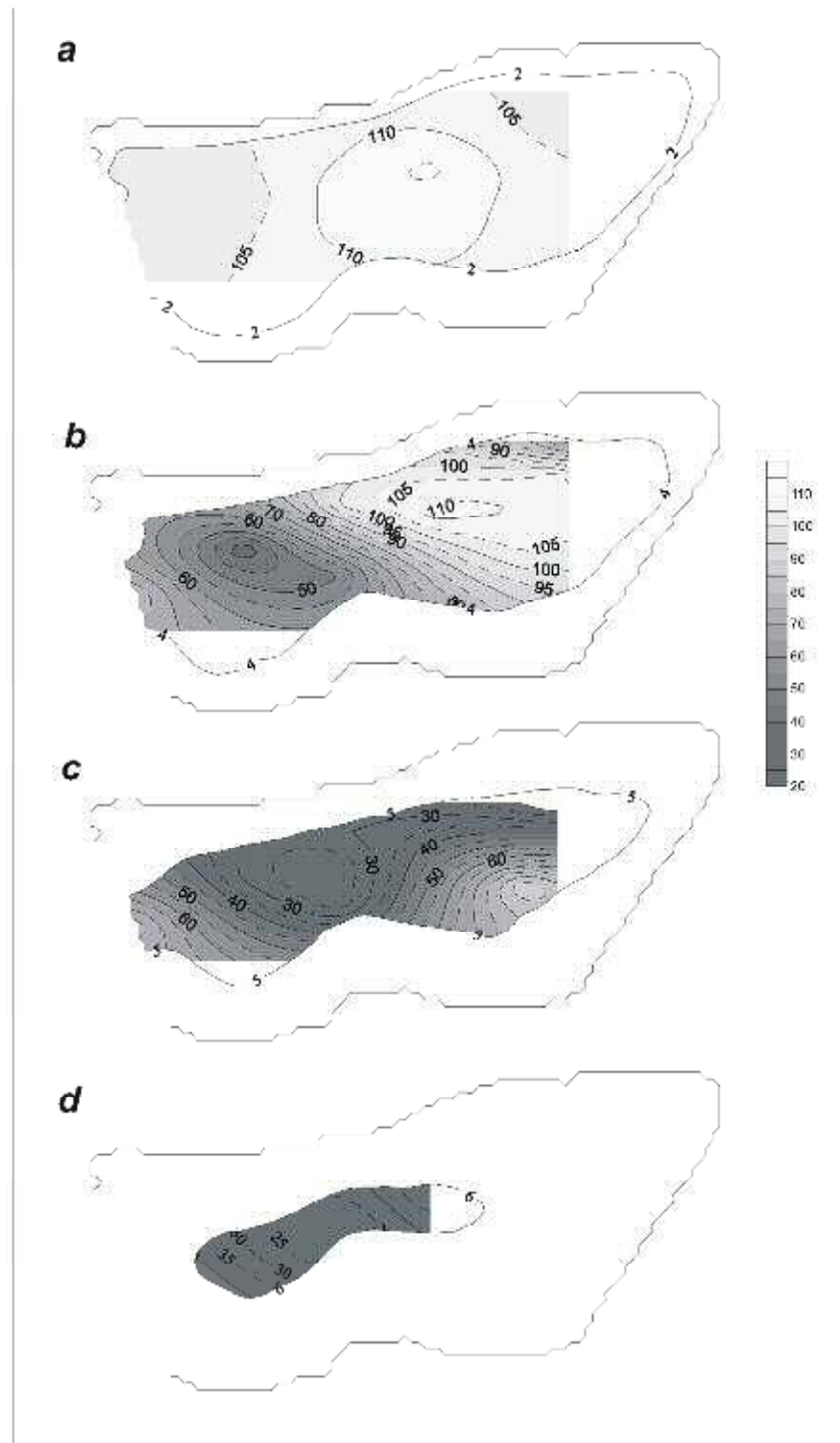


Figura 3.10 Seccions en fondària de la massa d'aigua pobre en oxigen el 25 de setembre de 1997: (a) a 2 m de fondària, (b) 4 m, (c) 5 m, (d) 6m.

Es van observar poques diferències de concentració d'oxigen en l'eix transversal de la badia (Figura 3.10), excepte sobre el fons prop de l'estació Cua (Figura 3.11), amb valors una mica més alts cap a la vora nord.

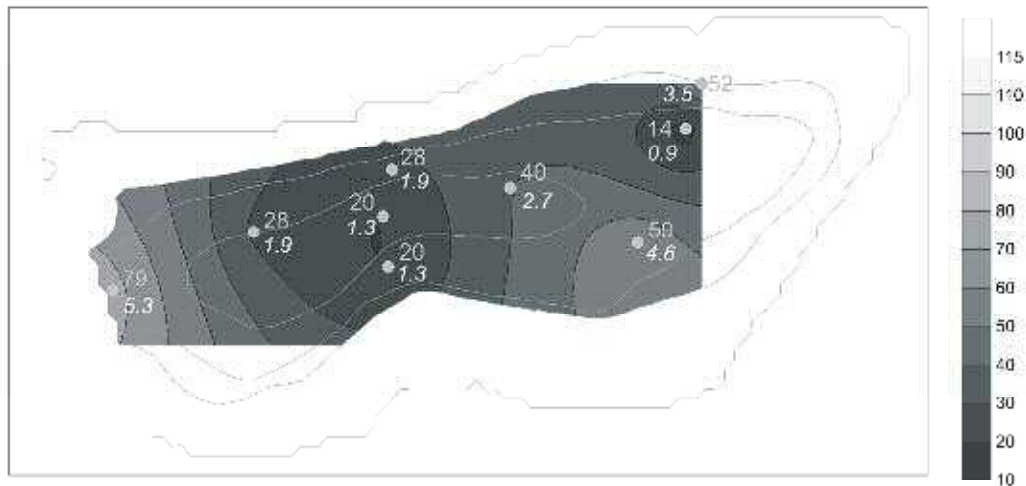


Figura 3.11 Mapa d'oxigen dissolt al fons de la badia dels Alfacs el 25 de setembre de 1997. Els valors en gris clar són expressats en % de saturació, i els valors en blanc i cursiva són concentracions expressades en mg l^{-1} .

Diferències entre anys

Les condicions generals de la badia al 1997 eren, durant la primera meitat de l'any, força similars a les del 1996. L'oxigen de l'aigua de fons va arribar a sobrepassar el 130 % a finals de juny de 1996 (Figura 3.12a; o en isolínies, Figura 2.12c, plana 85), però mentre les setmanes posteriors a aquestes dates no van mostrar davallades sobtades de saturació d'oxigen, el 1997 van aparèixer uns mínims per sota de 70%.

La variables amb diferències més notables entre ambdós anys aporten dades per explicar aquest comportament diferent de l'oxigen dissolt, i són el vent, la salinitat i la temperatura de l'aigua de la capa de fons.

El 1996 van existir dos episodis de vent de Mestral de més de 5 m s^{-1} de mitjana diària entre juny i juliol (Figura 3.12b, Figura 2.11c, d), a més de dos episodis de renovació d'aigua marina pel fons per intrusió d'aigua de més de 37 psu (Figura 2.12a). Ni aquests vents van bufar ni es van donar aquesta magnitud de renovació d'aigua del fons per intrusió salada el 1997, any en què l'oxigen va davallar fins a menys de 4 mg l^{-1} en els darrers dos metres de la columna d'aigua a principis de juliol. Aquestes davallades no es van observar el 1996 (Figura 3.12a).

Així, a tots dos anys es veu com es produeix un descens en l'oxigen dissolt, que sembla estar relacionat amb la salinitat del fons de la columna d'aigua. La davallada d'oxigen per sota de 70% de finals d'agost no va durar més d'una setmana el 1996 (coincidint amb la "desaparició" de l'aigua de salinitat superior als 36 psu, Figura 3.12c), mentre que el 1997 els valors de saturació d'oxigen per sota de 70% i les salinitats per sobre de 36 psu, o bé es van mantenir, o bé van tornar a aparèixer

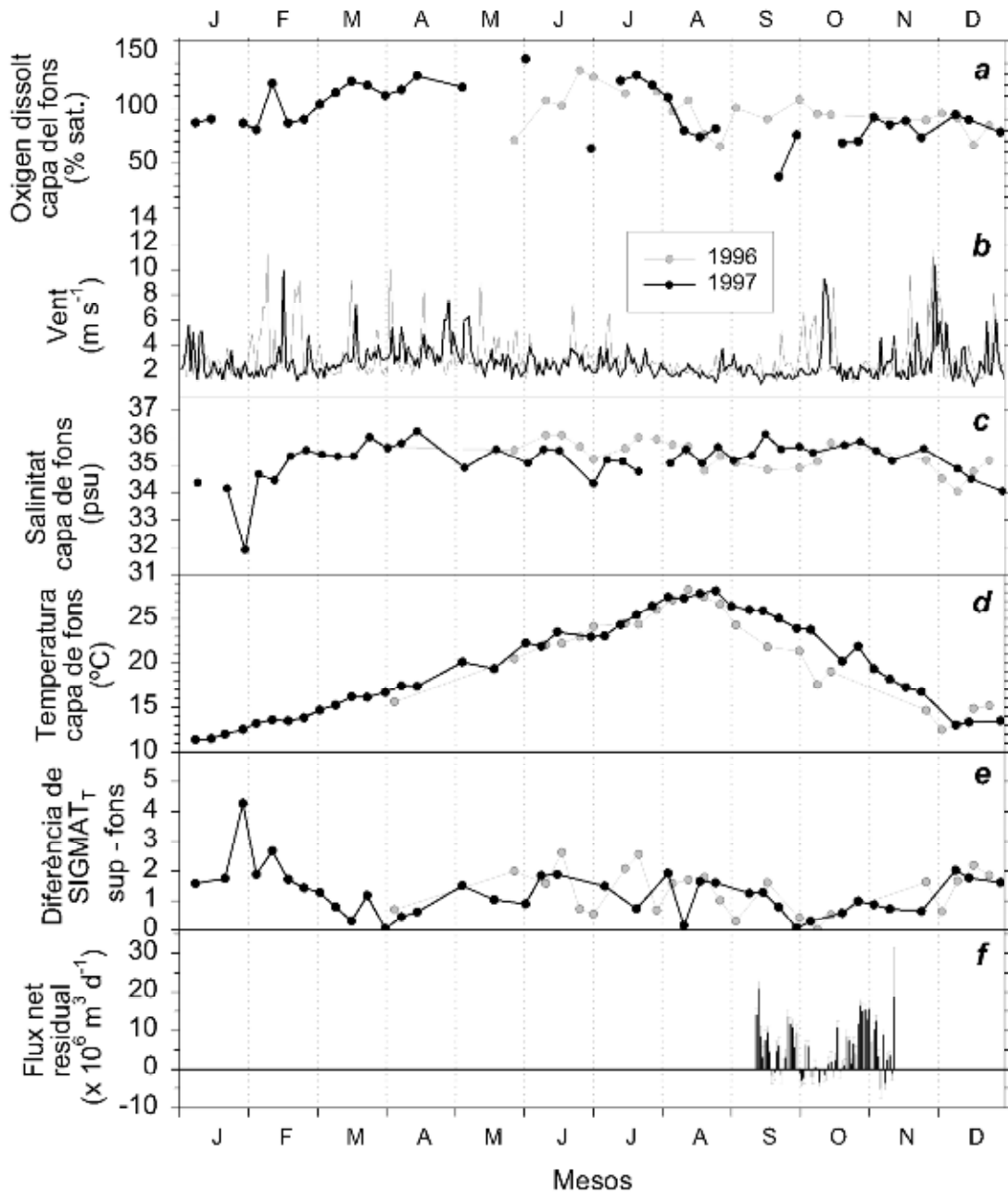


Figura 3.12 Evolució temporal de: (a) oxigen dissolt (% saturació), (b) velocitat del vent ($m s^{-1}$), (c) salinitat (psu), (d) temperatura ($^{\circ}C$), (e) diferència de $SIGMA_T$ entre les capes de fons i superfície, i (f) flux net residual ($\times 10^6 m^3 d^{-1}$). Els valors d'oxigen, salinitat, i temperatura són valors setmanals, mitjans per tota la capa de fons (els tres darrers metres de la columna d'aigua) al punt central de la badia; els de vent són valors mitjans diaris de l'estació Amposta-DARP; els de flux net residual positius són d'entrada d'aigua a la badia. Es mostren les sèries de dades de 1996 (gris) i 1997 (negre).

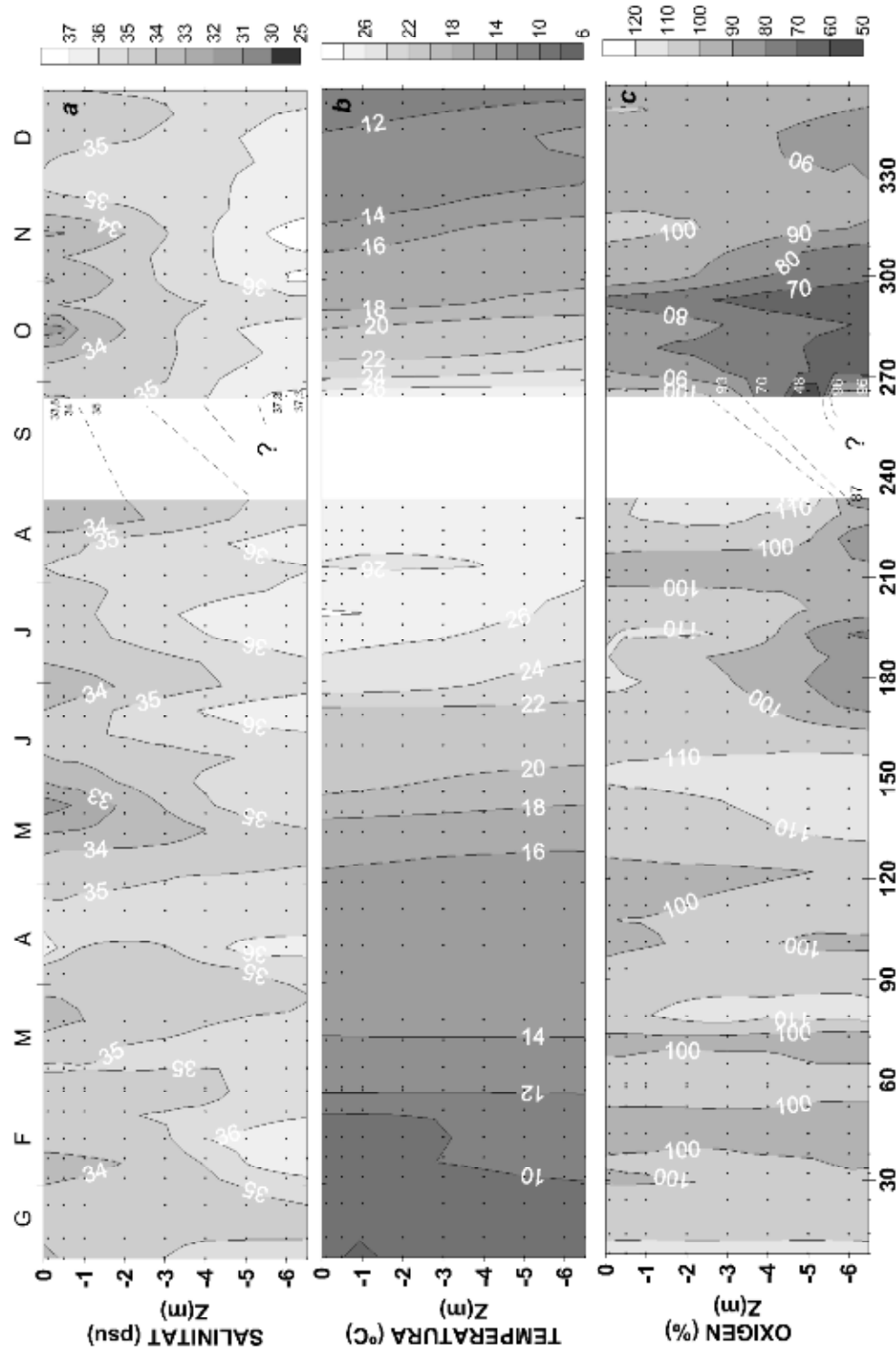


Figura 3.13 Evolució de (a) salinitat, (b) temperatura i (c) oxigen dissolt del punt mig de la badia dels Alfacs (1991). L'eix de les ordenades inferior està en dies julians a partir de 01/01/1991, i el superior en els mesos de l'any. L'origen d'aquestes dades és diferent que el de la seqüència de transsectes de setembre de la Figura 3.18, i es troben mancades del registre de les tres variables entre el 20/08 i el 23/09. S'han sobreimprès alguns valors discrets prop del dia 270 per facilitar la lectura dels perfils verticals donats en aquesta data (veure explicació al text). Les línies discontinües s'han dibuixat de forma arbitrària.

(Figura 3.12a, c; en isolínies, Figura 2.12a, c), a l'igual que el 1991 (Figura 3.13a, c).

Per altra banda, van haver 5 °C de davallada sobtada de la temperatura de tota la columna d'aigua en 20 dies el 1996 (de 26.5 °C el 26/08, a 21.7 °C el 16/09), coincidint justament amb l'inici de la recuperació dels valors de saturació d'oxigen dissolt del fons (Figura 3.12d, a). El 1997 no va haver cap davallada tan sobtada de les temperatures de la columna d'aigua al setembre, de per si ja un parell de graus per sobre, i a mitjans de mes l'aigua es trobava encara a 25.5 °C (4 °C més calenta que l'any anterior).

La causa d'aquesta major temperatura de l'aigua de la badia el 1997 respecte el 1996 podria estar en què la radiació neta absorbida per la plana deltaica de l'Ebre va ser molt superior (Figura 3.14). Val a dir que els màxims de radiació neta van ser el 1992 i 1994, els anys de major dèficit d'oxigen dissolt enregistrat a la columna d'aigua (Figura 2.8c).

Finalment cal remarcar que a finals d'agost, les diferències de SIGMA_T entre superfície i fons eren molt més acusades el 1997 que no pas el 1996 (Figura 3.12e), moment crític a partir del qual es creu que va davallar l'oxigen dissolt (Figura 3.12a, entre finals d'agost i mitjans de setembre).

Per últim, tot i no disposar de més dades de flux net residual que les compreses entre el 12 de setembre al 12 de novembre de 1997, s'observa que en el mes de setembre de 1997 es van donar increments de salinitat (respecte setmanes anteriors, i respecte els valors de 1996 també, Figura 3.12c) que van coincidir amb increments del flux net residual diari (Figura 3.12f).

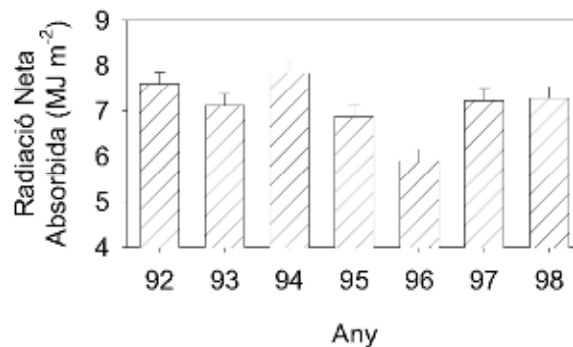


Figura 3.14 Evolució de la radiació neta mitjana anual (radiació global arribada menys radiació emesa) en MJ m^{-2} , rebuda per l'estació meteorològica d'Amposta-DARP (a partir de dades mostrades a la Figura 2.2d).

Discussió

Possible causa de l'origen de les hipòxies

La diferència més notable entre 1996 (sense hipòxia) i 1997 (amb hipòxia) va ser que en 1997, durant juny i juliol no es van donar els vents ni les intrusions d'aigua marina pel fons que van aparèixer en 1996, i durant setembre, la temperatura de l'aigua de la capa del fons va ser entre 2 i 4 °C més alta que en 1996, coincidint amb què la radiació neta absorbida per la plana deltaica de l'Ebre durant tot 1997 va ser molt superior a la de 1996.

Els factors de la temperatura i la renovació d'aigua de la capa de fons són citats per alguns autors com a factors clau per determinar l'aparició de les hipòxies. Borsuk *et al.* (2001) suggereixen que l'extensió espacial i la durada de la hipòxia de les aigües del fons de l'estuari Neuse (Carolina del Nord, EUA) són controlades pel balanç entre la velocitat neta d'esgotament d'oxigen (depenent de la temperatura) i la freqüència dels processos de barreja vertical, que explica el 79% de la variància de la concentració d'oxigen dissolt. Per exemple, segons el seu estudi, s'esperarien concentracions sota 4 mg O₂ l⁻¹ en períodes sense barreja vertical quan la temperatura del fons excedís els 15 °C, mentre que únicament s'esperarien concentracions per sota de 2 mg O₂ l⁻¹ quan la temperatura excedís els 20 °C. Buzzelli *et al.* (2002), en la mateixa línia, van trobar que l'estratificació salina i la temperatura de l'aigua explicaven respectivament el 30 i el 23% de la variància de les concentracions d'oxigen dissolt del fons en el mateix estuari. També van descriure que prop del 80% dels perfils hidrogràfics mostraven hipòxia en el fons quan la diferència de salinitat entre superfície i fons era de 5 psu i la temperatura excedia els 20 °C, disminuint la quantitat d'estratificació salina necessària per induir hipòxia en augmentar la temperatura. Hi ha altres casos descrits a la literatura que relacionen les hipòxies amb la pujada de les temperatures de l'aigua (Matthaeus *et al.* 2001, Harzallah i Chapelle 2002), però també existeixen estudis on no han trobat aquesta relació en increments de fins a 6 graus de l'aigua hipòxica, per que predominen altres processos físics que mantenen constant la davallada de la concentració d'oxigen dissolt independentment de la temperatura (Fujiwara *et al.* 2002). A la badia dels Alfacs va coincidir justament una forta estratificació i una alta temperatura (prenent com a referència els valors de 1996). Ara bé, els efectes concrets de l'estratificació i de la temperatura en el nostre cas no estan quantificats.

Intercanvi vertical i horitzontal durant la hipòxia

Durant el període hipòxic es va mantenir força disminuïda la renovació d'aigua de la capa fonda, com es pot deduir de les dades enregistrades de la setmana del 16 i el 21 de setembre de 1997 (Figura 3.7). Aquesta poca renovació de l'aigua fonda de la columna d'aigua només va ser interrompuda momentàniament per l'arribada d'episodis locals de vent de Mestral (perpendicular a l'eix principal de la badia) i de Migjorn (sentit oposat a la circulació estuària positiva), que van produir prou flux advection i, sobre tot, no-advection, com per aturar temporalment la davallada diària de concentració d'oxigen dissolt dels dies previs (20 de setembre respecte dies previs, Figura 3.7c).

Així, es pot observar com el 16 de setembre la massa d'aigua fonda just en contacte amb el sediment va ser bastant salina, fet que només és possible si aquesta aigua s'hagués mantingut relativament aïllada (Figura 3.7a). Aquesta aigua de 38 psu pot procedir de mar obert (que no sol passar de 37.5 psu just al costat del ressalt de la badia, malgrat que just a prop del fons pot assolir valors de 38 psu), o d'aigua hipersalina formada, eventualment, en el marge somers de la badia, a causa de l'elevada evaporació estival sense precipitació. Val a dir que no es pot parlar d'hipersalinitat a la badia dels Alfacs, pròpiament, com es faria en altres badies estuàries mediterrànies (Largier *et al.* 1997), per que el conjunt de la capa fonda, en general, no té salinitat superior als valors mitjans de l'aigua del Mediterrani proper per sota de la seva pycnoclina.

El registre corregit de fondària de la sonda mostra que la columna d'aigua va disminuir d'alçada, tot i les oscil·lacions, al llarg dels dies (Figura 3.9), en paral·lel a la disminució del flux net residual diari dels mateixos dies (Figura 1.13a). L'entrada mesurada d'aigua a la badia dels primers dies de la segona quinzena de setembre de 1997 va augmentar lleument la renovació de la capa fonda (Figura 3.7a, b), però encara no es va veure reflectida en gaire millora de la concentració d'oxigen dissolt, que continuava la seva tendència de disminució neta dia a dia (Figura 3.7c). A finals del 19 de setembre va ser quan l'oxigen dissolt ja no va disminuir, com va fer dies anteriors, sinó que va començar a manifestar una sèrie d'oscil·lacions que, en mitjana, van mantenir la concentració estable, a diferència del que havia passat dies previs a les mateixes hores del cicle diari. Aquest canvi en la seva dinàmica coincideix amb l'evolució oscil·lant en la sèrie de temperatura i salinitat descrita per al dia 20 de setembre (Figura 3.7a, b), i coincideix també amb què el flux net residual pel fons era pràcticament nul o fins i tot negatiu (de sortida de la badia; Figura 1.13a). Per tant, el flux d'entrada per sobre del ressalt dels primers dies no va contrarestar prou el dèficit local en el balanç d'oxigen. És a partir de l'arribada de vent de Mestral (Nord-Oest) que es va aturar la dinàmica prèvia (Figura 3.8b, c), i en virar cap a Migjorn (Sud), va augmentar suficientment la renovació de l'aigua de la capa fonda com per compensar el balanç negatiu d'oxigen. És a dir, la renovació efectiva de l'aigua fonda d'aquests dies de 1997 no va semblar donar-se per la circulació estuària bicapa, sinó més aviat per fenòmens puntuals com el vent creuat descrit en aquest cas (que va afavorir tant el flux advectioniu com el no advectioniu) per aportar oxigen a la capa fonda.

Flux no advectioniu i disminució o acabament del procés hipòxic

Val la pena incidir en que en el cas de la hipòxia de 1997, el flux advectioniu no va ser decisiu per disminuir o finalitzar la hipòxia, mentre que la presència d'estratificació per entrades d'aigua dolça per superfície (i per tant, la disminució del flux no advectioniu) va permetre que es donessin els valors més baixos d'oxigen dissolt enregistrats a la badia dels Alfacs entre 1996 i 1998, tal i com es pot deduir del conjunt de resultats setmana a setmana del mes de setembre (de la Figura 3.3 a la Figura 3.6, entre altres).

Els mínims enregistrats d'oxigen (29 % de saturació en el darrer metre de la columna d'aigua el 22 de setembre) coincideixen amb els mínims previsibles de renovació vertical de la capa fonda (flux no advectioniu), atesa l'aparició d'una massa d'aigua al fons de l'estació *Mig* amb salinitat superior a 37 psu

el 15 de setembre i l'estructura de salinitats de dies posteriors (Figura 3.4). No sembla que l'advecció horitzontal hagués servit per reduir de forma notable la hipòxia, per que si no, s'hauria d'haver observat una millora (que no es va observar) en el moment de l'entrada de la massa d'aigua de més de 37 psu pel fons (Figura 2.12a, c, dia julià 630); millora que en canvi s'ha observat en molts altres indrets (Munekage *et al.* 1991, Neumann *et al.* 1997), malgrat en algunes ocasions les intrusions marines han contribuït a que les condicions d'oxigen de la zona empitjorin encara més (Weigelt 1990).

Posteriorment als mínims absoluts d'oxigen enregistrats al punt central⁷ (plana 70), es va observar que el 23 de setembre va arribar un front meteorològic que va descarregar pluja provocant que la precipitació neta fos 15 l m⁻² el dia 24 de setembre (dia julià 632 en el gràfic) i 7.2 l m⁻² el 25 de setembre (Figura 2.11c). Això va coincidir, un dia més tard, amb l'estratificació vertical més forta (observar la baixada de la salinitat en superfície a l'estació *Mig*, Figura 3.4b, probablement a conseqüència de l'increment dels fluxos dels canals, en especial del de sortida de l'Encanyissada) i, a la vegada, amb la inhibició momentània del corrent net residual diari d'entrada d'aigua (Figura 1.13a, plana 41). Durant aquestes setmanes els vents no van passar dels 2 m s⁻¹ de velocitat mitjana diària (Figura 2.11c, plana 84) amb màximes diàries inferiors a 8 m s⁻¹. L'aigua salada de mar obert amb salinitats superiors a 37 psu es va apropar a la boca d'entrada a la badia pel fons (Figura 3.4b) i la circulació de l'aigua superficial cap a mar obert va tendir a generar un contraflux inferior d'aigua que entrés a la badia, tal i com va ocórrer de manera molt notable durant els cinc dies següents (Figura 1.13a, plana 41). Aquesta circulació potenciada pel gradient de densitat horitzontal existent va permetre que poc a poc disminuís la hipòxia del fons (passa del 14% al 40% al fons de l'estació *Cua* en una setmana, Figura 3.3b, c), sigui per que les masses d'aigua presentessin turbulència per fricció en les seves interfases respectives (flux no advection), sigui a causa del transport net de masses d'aigua (flux advection), o una barreja d'ambdós tipus de fluxos.

Ara bé, el fet diferencial que va acabar per complet amb el període hipòxic no va ser un augment de la circulació estuariana positiva, com s'havia citat en hipòxies prèvies, ja que en aquest cas es dona una disminució d'aquesta circulació. Es creu que el factor clau, més que la renovació per advecció horitzontal de l'aigua fonda, és l'augment de la renovació per turbulència i intercanvi d'aigua vertical (flux no advection). A partir del 30 de setembre es va iniciar un procés d'alentiment del corrent net residual de la massa d'aigua del fons (és a dir, de la circulació bicapa), que tret de les entrades puntuals d'aigua de mar obert del 4 i 5 d'octubre, va arribar molts dies fins tot a revertir el sentit de la circulació estuariana (Figura 1.13a, b). Aquesta circulació mínima o fins i tot inversa va anar acompanyada de la recuperació més important de les concentracions d'oxigen de la capa de fons, arribant ja a més del 80% en fondària (Figura 3.3d).

⁷ Cal recordar que els valors del punt central no són els més baixos de la badia, sinó que ho solen ser els de l'extrem més oriental del transecte oest-est, al fons de l'estació *Cua* (Camp 1994 i Figura 3.3), amb prop d'un 10% menys.

Aquesta turbulència vertical de la setmana en que s'acaba la hipòxia (entre l'1 i el 9 d'octubre) és provocada per vents de Garbí de prop de 2 m s^{-1} de velocitat mitjana diària durant 8 dies seguits (dades no mostrades). Un Garbí amb la mateixa velocitat també va bufar entre el 3 i el 16 de setembre durant tots els dies quasi ininterrompudament, però l'elevada estratificació existent (Figura 2.17a, Figura 3.12e), van impedir que vents d'aquesta poca intensitat poguessin afectar gaire a l'oxigen dissolt de l'aigua del fons (Figura 3.3a).

El dia 10 d'octubre de 1997 va començar a bufar vent fort de Mestral amb una mitjana diària de velocitat de 9.3 m s^{-1} (33 km h^{-1}) dos dies més tard, amb màximes diàries superiors a 21 m s^{-1} durant tres dies seguits i ràfegues instantànies de fins a 26.5 m s^{-1} (95 km h^{-1}). El vent va acabar de barrejar totalment la badia (Figura 2.12a), malgrat aquesta ja s'havia recuperat del període hipòxic amb anterioritat. A partir del pas del front, la badia va anar recuperant el seu funcionament de rebre aportos d'aigua dolça per superfície i d'aigua salada pel fons, i en dues setmanes més ja s'havia produït l'estratificació de nou, amb diferències de 3 psu de salinitat entre els dos extrems de la columna d'aigua (les màximes diferències de salinitat registrades en les últimes sis setmanes, Figura 3.4e), i ja es recuperaven finalment les entrades d'aigua de mar obert (Figura 1.13b, plana 41). Aquesta nova reducció de l'intercanvi entre la capa inferior i superior de la columna d'aigua va permetre que el balanç d'oxigen dels processos biològics, encara negatiu presumiblement, tornés a fer baixar la concentració d'oxigen de la capa de fons i la mantingués al voltant del 70% de saturació, respecte el 100% superficial (Figura 3.3e). Aquesta situació va durar algunes setmanes més encara fins principis de novembre, a pesar de l'entrada neta d'aigua de mar obert de fins $15 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ durant uns quants dies (Figura 1.13b). L'oxigen dissolt no es va acabar de recuperar totalment fins passat el 3 de novembre (Figura 2.12c, plana 85; i Figura 3.12a), i la temperatura ja era llavors de prop de $18 \text{ }^\circ\text{C}$, 10° menys que la màxima estival mesurada (Figura 2.12b; i Figura 3.12d), amb la conseqüent previsible disminució dels processos respiratoris respecte mesos anteriors. Ja no va tornar a aparèixer cap dèficit notori d'oxigen en dies posteriors (malgrat l'estratificació vertical existent de nou).

Val a dir, com a apunt final sobre el flux no advectioniu, que en tot aquest procés l'existència d'ones internes que viatgin per la pycnoclina, i les seques superficials, que eventualment s'han descrit a la badia (veure Camp 1994 i Capítol 1) de forma similar al que passa en altres indrets (Munekage *et al.* 1982, Munekage i Kimura 1983), actuarien en la línia de potenciar també la barreja vertical de la massa d'aigua del fons amb la superficial (Munekage *et al.* 1986). I també afavoriria la barreja de l'aigua de la cubeta més fonda de la badia (Figura 1.2, Figura 1.3) amb la de les plataformes someres (flux no advectioniu), habitualment molt sobresaturada d'oxigen a l'estiu (no són estranyes les concentracions superiors fins i tot a 200% quan l'aigua és calmada en zones de menys de 2 m d'aigua durant el migdia). D'aquesta forma, aquests dos fluxos no advectionius erosionarien l'estratificació i generarien turbulència entre les dues masses d'aigua, arribant a barrejar-les totalment en les zones de les badies on augmenta el pendent de relleu del fons (Figura 3.15c, d).

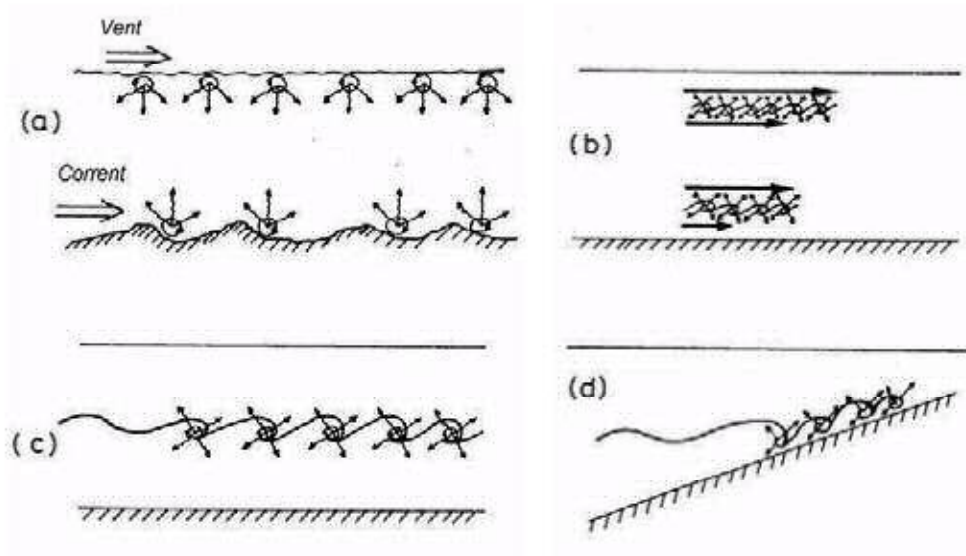


Figura 3.15 Fonts d'energia cinètica turbulenta en un sistema aquàtic somer, a partir de Svendsen (1986): (a) entrada externa d'energia, (b) estrès de fricció generat pel corrent, (c) el trencament d'ones internes en una picnoclina, i (d) el trencament d'ones internes sobre un contorn amb pendent en direcció vertical.

Diferències respecte a altres episodis d'hipòxia coneguts

La hipòxia de 1997 i les de 1990 i 1991 a la badia dels Alfacs difereixen fonamentalment en la forma com van finalitzar, per un costat, i en la localització espacial dels mínims d'oxigen dissolt observats, per l'altra. Sembla, a més, que les velocitats d'aparició i desaparició d'oxigen dissolt a la columna d'aigua van ser superiors el 1997 respecte de les altres dues.

Així, la hipòxia de l'any 1990 va aparèixer després d'un dèficit notori d'oxigen durant aproximadament 50 dies (Figura 3.16a - c), i va acabar per l'arribada d'un temporal de llevant que a primers d'octubre devia barrejar tota la columna d'aigua, i tot i que es recuperés l'estratificació en breu posteriorment, la capa profunda ja va mantenir concentracions properes a la saturació (Figura 3.16d). Això està en la línia dels primers treballs sobre generació d'hipòxies a la badia dels Alfacs, que donaven una gran importància per a l'oxigenació de la capa fonda al trencament de l'estratificació amb vents associats al pas de fronts atmosfèrics (Camp *et al.* 1991). Al 1997, en canvi, la concentració d'oxigen va iniciar la seva recuperació sense l'acció de cap pas d'un front amb forts vents, sinó a causa de la progressiva erosió de la massa d'aigua de fons per augment de l'advecció i turbulència vertical, fonamentalment, amb l'acció continuada de vents relativament moderats.

Un altra diferència, malgrat petita, va ser la localització espacial dels mínims registrats. L'any 1990 (Figura 3.17) aquests es van trobar a la part més interior de la badia (entre 0 i 25% de saturació), i desplaçats cap a la plataforma nord d'aquesta. L'any 1997 (Figura 3.11a) també presenta els seus mínims a la part més interior de la badia (14% de saturació) però mostra una segona disminució considerable de la concentració d'oxigen (20%) cap a la zona central, a diferència de la distribució de 1990.

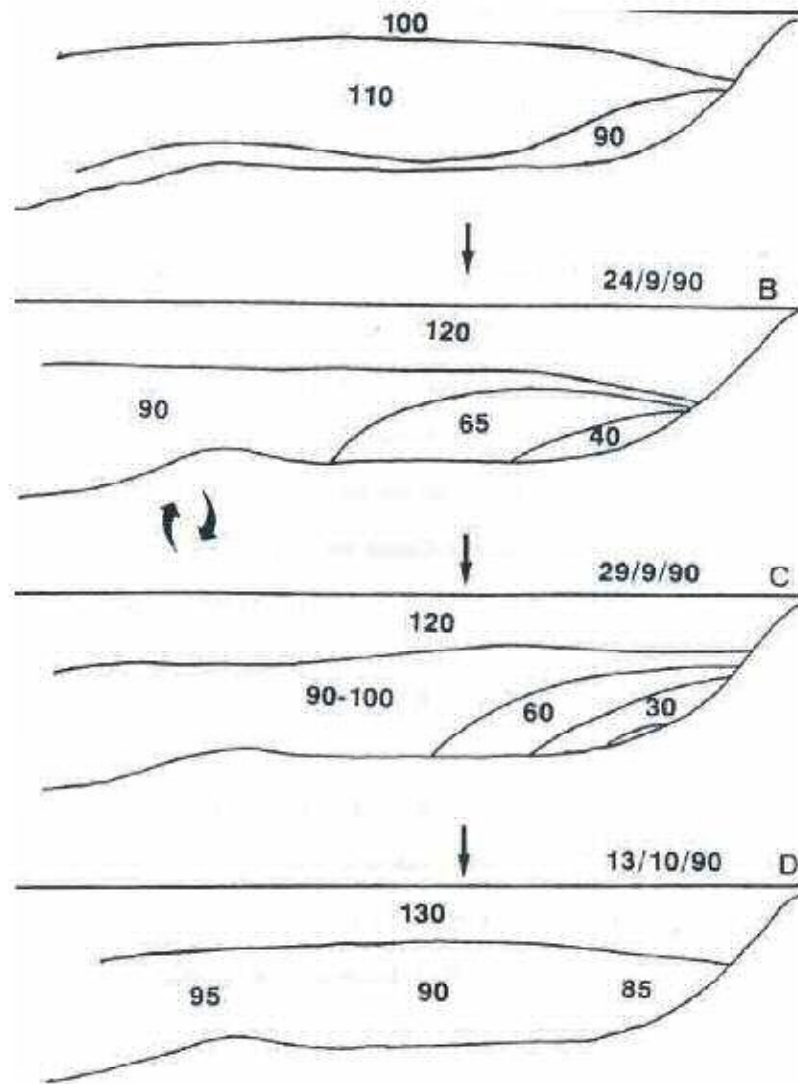


Figura 3.16 Distribució de concentracions d'O₂ en % de saturació, a la Badia dels Alfacs en estiu-tardor de 1990. Tret de Camp (1994).

L'episodi d'hipòxia de 1991, va mostrar una distribució espacial dels mínims d'oxigen (Figura 3.18) també com la del 1990. La hipòxia de l'any 1991, a més, es va veure modulada pel corrent d'entrada d'aigua marina per la boca de la badia, i la diferència més evident trobada respecte la hipòxia de 1997 rau en que la primera es va veure fortament reduïda per les entrades d'aigua marina exterior (flux advection), mentre que la reducció principal de la hipòxia de 1997, com s'ha explicat abans, va ser fonamentalment per flux no advection. Així, el flux net residual d'entrada d'aigua de mar obert a finals d'estiu de 1991 devia ser capaç de compensar el consum local d'oxigen mentre el valor d'aquest fos superior a 1 cm s^{-1} de corrent mig residual, segons va constatar Camp (1994) a partir de la seqüència de situacions observada (31/08/91 - 23/09/91). En el seu treball no es comenta com continua la situació en setmanes posteriors, però a partir del registre de mesures del Centre Nacional d'Aqüicultura (que manca de la distribució de salinitats de les setmanes entre agost i setembre) es pot observar que una massa d'aigua salada de més de 37 psu es troba situada al fons de la columna d'aigua el 23/09/91 (Figura 3.13a).

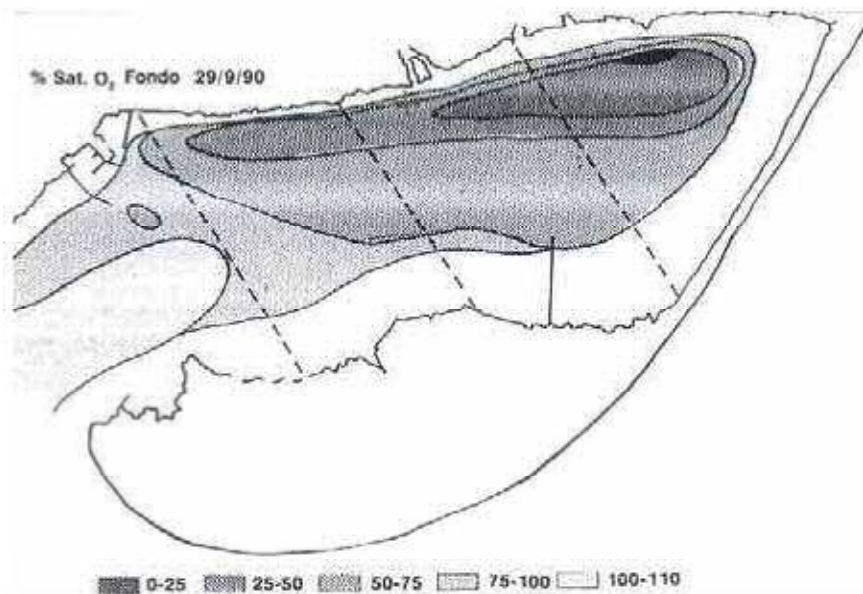


Figura 3.17 Mapa horitzontal de l'anòxia sobre el fons de l'estuari en el període descrit per Figura 3.16c. Tret de Camp (1994).

Aquesta massa d'aigua salada conté de l'ordre de 96% de saturació (Figura 3.13c), i just per sobre seu mostra un aigua de salinitat inferior i de 48 % de saturació d'oxigen (que equival a 3.1 mg O₂ l⁻¹ en aquella temperatura i salinitat donada)⁸. Una possible explicació d'aquest mínim d'oxigen separat un metre i mig del fons pot ser senzillament que la massa d'aigua salada de més de 37 psu hagués entrat avançant recentment d'oest a est fins aquesta posició, desplaçant la massa d'aigua hipòxica en contacte amb el fons que allà es trobava els dies previs, de forma similar a les entrades ocasionals d'aigua fonda per sobre del ressalt que es donen en fiords. O bé podria haver estat provocat per entrada d'aigua lateral de la badia. En qualsevol cas, la distribució d'oxigen dissolt a la badia el dia 20/09/91 que es mostra a la Figura 3.18 podria ser, en aquest cas, conseqüència del fort flux d'entrada momentani dels dies previs a aquest (amb velocitat mitjana 3 cm s⁻¹), però la seva disminució posterior (baixant fins a 1 cm s⁻¹ en mitjana) podria haver permès l'entrada a polsos del flux d'aigua salada pel fons fins a aixecar la massa d'aigua hipòxica establerta al punt central. Posteriorment al 23 de setembre, es desconeix com va evolucionar el flux net d'aigua de fons, però les salinitats en contacte amb el sediment van descendir a 36.4 psu en una setmana (Figura 3.13a), amb el que es dedueix que podia haver disminuït l'intercanvi horitzontal amb l'aigua procedent de l'exterior de la badia, i/o haver augmentat l'intercanvi vertical amb l'aigua de sobre.

⁸ Aquesta dada pot ser fruit d'un error d'anotació dels que van prendre les dades, però malgrat eliminem aquest valor fora del comú, ens trobem amb un aigua de menor concentració d'oxigen a fondàries intermèdies (70% a 4 m), i aigües de més de 90% per sobre i per sota momentàniament en aquesta data, amb la particularitat que només l'aigua de sota va acompanyada de salinitats molt superiors a la resta de la columna d'aigua d'aquella data i mesos propers.

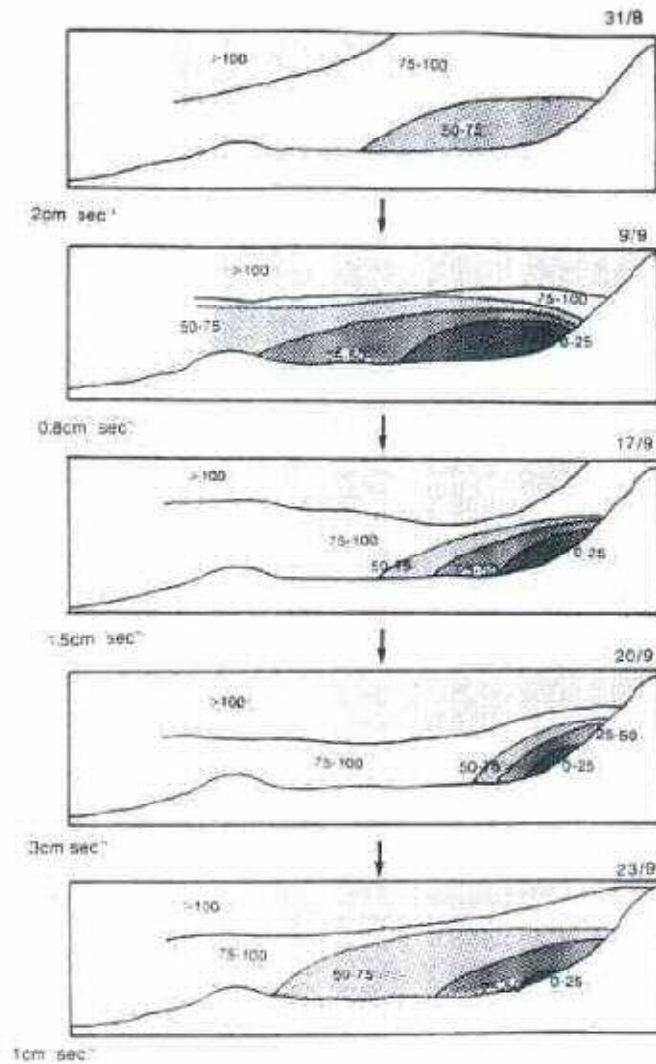


Figura 3.18 Evolució de la distribució de saturacions d'oxigen en la capa profunda de l'aigua de la badia en relació amb el corrent net residual (entrada) mesurat a la boca de la badia promitjat per les 72 hores anteriors a cada distribució (any 1991). Tret de Camp (1994).

Les concentracions d'oxigen dissolt van disminuir ràpidament de nou en aquesta situació, en que presumiblement van continuar els fluxos d'aigua de fons amb velocitats inferiors a 1 cm s^{-1} , arribant de nou a prop del 60 % de saturació les següents setmanes d'octubre, mentre es va crear de nou una massa d'aigua de 32 psu en superfície. Val la pena assenyalar que a finals d'octubre per a ambdós casos de 1991 i 1997, l'entrada d'aigua de mar pel fons va ajudar a pujar els valors de concentració d'oxigen dissolt, tot i que el pitjor de la hipòxia ja hagués passat (Figura 3.13c, i Figura 2.12c, per a 1991 i 1997, respectivament). Els aportes d'aigua de prop del dia julià 285 (mitjans d'octubre) de l'any 1991 van anar seguits d'una entrada significativa d'aigua de mar obert pel fons amb salinitats superiors a 37 psu a principis de novembre (arribant a 37.4 psu a mitjans del mateix mes), que van succeir en paral·lel a una pujada de la concentració d'oxigen dissolt (Figura 3.13c). I un fenomen similar va ocórrer el 1997 a la segona quinzena d'octubre, quan els increments del flux net residual diari d'entrada a la badia (Figura 3.12f) van coincidir amb pujades de la concentració d'oxigen dissolt de la capa de fons (Figura 3.12a), tot i els factors en contra de la recuperació de l'oxigen com van ser

la manca de vent (Figura 3.12b) i la pujada relativa de la temperatura de l'aigua de fons (Figura 3.12d) per entrada d'aigua més calenta de l'exterior de la badia (Figura 3.12f).

Un altra diferència entre 1991 i 1997 va ser que en el primer la producció i el consum d'oxigen de la capa fonda semblen més grans el 1997 que no pas el 1991. A finals de maig van aparèixer els valors màxims de concentració d'oxigen al fons (115 % al 1991, 130 % al 1997), i un mes i mig més tard, a principis de juliol, els mínims relatius (80 % al 1991, 70 % al 1997). Això suggereix que la producció d'oxigen a la capa fonda va ser més elevada el 1997, i també ho va ser el seu posterior consum. Aquesta observació és compatible amb la hipòtesi d'una major biomassa fitobentònica al 1997 que al 1991.

A mode de síntesi

Tot això porta a concloure que una major temperatura de l'aigua és clau per facilitar l'aparició de les hipòxies alguns anys però altres no a la badia dels Alfacs. Que aquesta major temperatura pot estar causada per una major radiació solar neta sobre la plana deltaica. Que per que es mantingui la hipòxia ha d'haver absència de vents forts ocasionals o més lleus però continuats, i ha d'haver poca renovació de l'aigua de fons, sigui per manca de flux advectioniu per intrusió d'aigua salada exterior, o bé per manca de flux no advectioniu amb la capa superior. I si bé la producció d'oxigen a la columna d'aigua sembla ser superior a 1997 respecte 1991, el seu consum també ho sembla ser, de forma compatible amb la hipòtesi d'una major biomassa fitobentònica a la segona meitat de la dècada dels 90 respecte la primera.

Bibliografia

- Borsuk, M. E., *et al.*, 2001. Modelling Oxygen Dynamics in an Intermittently Stratified Estuary: Estimation of Process Rates Using Field Data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52 (1): 33-49.
- Borum, J., 1996. "Shallow waters and Land/Sea Boundaries", a *Eutrophication in coastal Marine Ecosystems*, 52, 179-203. American Geophysical Union, Washington DC.
- Buzzelli, C. P., *et al.*, 2002. Estimating the spatial extent of bottom-water hypoxia and habitat degradation in a shallow estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 230 103-112.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Camp, J., *et al.*, 1991. Production-consumption budget in an estuarine bay: how anoxia is prevented in a forced system. *Oecologia aquatica*, 10 145-152.
- Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.
- Fujiwara, T., *et al.*, 2002. The Role of Circulation in the Development of Hypoxia in Ise Bay, Japan. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54 (1): 19-31.
- Gade, H. G. i Edwards, A., 1980. "Deep water renewal in Fjords", a *Fjord Oceanography*, 4, 453-489. Plenum Press, New York.
- Gray, J. S., *et al.*, 1988. Analysis of community attributes of the benthic macrofauna of Frierfjord/Langesundfjord and in a mesocosm experiment. *Marine Ecology Progress Series*, 46 151-165.
- Harzallah, A. i Chapelle, A., 2002. Contribution of climate variability to occurrences of anoxic crises malaigues in the Thau Lagoon (southern France). *Oceanologica Acta*, 25 (2): 79-86.
- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.

- Kemp, W. M., *et al.*, 1992. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake bay: Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 85 (1-2): 137-152.
- Kester, D. R., *et al.*, 1996. Modeling, measurements, and satellite remote sensing of biologically active constituents in coastal waters. *Marine Chemistry*, 53 131-145.
- Kester, D. R. i Magnuson, A., 1994. Evaluation of the YSI rapid-pulse dissolved oxygen sensor: 22.
- Largier, J. L., *et al.*, 1997. Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45 (6): 789-797.
- Matthaeus, W., *et al.*, 2001. The Baltic Sea in 1999 - stabilization of nutrient concentrations in the surface water and increasing extent of oxygen deficiency in the central Baltic deep water. *Meereswiss Ber., Mar. Sci. Rep.*, 45 3-26.
- Munekage, Y., 1992. Application of a two-layer box model to dissolved oxygen budget in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 35 (1): 129-145.
- Munekage, Y. i Kimura, H., 1983. Hydraulic environment and mechanism of water movement at Uranouchi Inlet in summer and autumn seasons. *Coast. Eng. Japan*, 26 252.
- Munekage, Y., *et al.*, 1986. Effect of internal waves on mixing of sea water and formation of water masses in Uranouchi Bay. *Rep. USA Mar. Biol. Inst. Kochi Univ. Kochidai Kaiyoseibutsu Kenpo*, 8 35-44.
- Munekage, Y., *et al.*, 1982. Mechanism of water movement in Uranouchi Inlet. *Coast. Eng. Japan*, 25 295.
- Munekage, Y., *et al.*, 1991. Intrusion of external saline water influencing anoxic water in Uranouchi Bay. *Nippon Suisan Gakkaishi Bull. Jap. Soc. Sci. Fish.*, 57 (9): 1635-1643.
- Neumann, T., *et al.*, 1997. Geochemical records of salt-water inflows into the deep basins of the Baltic Sea. *Cont Shelf Res*, 17 (1): 95-115.
- Officer, C. B., 1980. "Box model revisited", a *Estuarine and wetland processes: with emphasis on modelling*, 65-114. Plenum Press, New York.

- Officer, C. B., *et al.*, 1984. Chesapeake Bay Anoxia: Origin, Development, and Significance. *Science*, 223 22-27.
- Richards, F. A., 1965. "Anoxic Basins and Fjords", a *Chemical Oceanography*, 1, 611-645. Academic Press, London.
- Rosenberg, R., 1985. Eutrophication - the future marine coastal nuisance? *Marine Pollution Bulletin*, 16 227-231.
- Saelen, O. H., 1967. "Some features of the Hydrography of Norwegian Fjords", a *Estuaries, Publication / American Association for the Advancement of Science*, 83, 63-70. American Association for the Advancement of Science, Washington, D.C.:
- Seliger, H. H. i Boggs, J. A., 1988. "Long term patterns of anoxia in the Chesapeake Bay", a *Understanding the estuary: advances in Chesapeake Bay research*, 129, 570-583. Chesapeake Research Consortium. Solomons.,
- Stanley, D. W. i Nixon, S. W., 1992. Stratification and bottom-water hypoxia in the Pamlico river estuary. *Estuaries*, 15 (3): 270-281.
- Stigebrandt, A., 2001. "Fiord circulation", a *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2, 897-902. Academic Press, San Diego, USA.
- Svendsen, H., 1986. "Mixing and exchange processes in estuaries, fjords and shelf waters", a *The Role of Freshwater Outflow in Coastal Marine Ecosystems.*, 7, 13-46.
- Swanson, R. L. i Sindermann, C. J., 1979. Oxygen Depletion and Associated Benthic Mortalities in New York Bight, 1976. *NOAA Professional Paper 11*:
- Taylor, C. D. i Howes, B. L., 1994. Effect of sampling frequency on measurements of seasonal primary production and oxygen status in near-shore coastal ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 108 193-203.
- Turner, R. E., *et al.*, 1987. The role of stratification in the deoxygenation of Mobile Bay and adjacent shelf bottom waters. *Estuaries*, 10 13-19.
- UNESCO, 1981. Tenth report of the joint panel on oceanographic tables and standards. *UNESCO Technical Papers in Marine Sci.*, 36:

Weigelt, M., 1990. Oxygen conditions in the deep water of Kiel Bay and the impact of inflowing salt-rich water from the Kattegat. *Meeresforsch*, 33 (1): 1-22.

**Capítol 4. Processos a la columna d'aigua que
es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen
dissolt**

Capítol 4. Processos a la columna d'aigua que es relacionen amb la dinàmica de l'oxigen dissolt

Introducció general

En aquest capítol s'analitzen els principals processos que succeeixen a la columna d'aigua i que estan relacionats amb la dinàmica d'oxigen dissolt.

Per a la columna d'aigua, els canvis de concentració d'oxigen dissolt són el resultat de diversos processos que, en primera consideració i per espais curts de temps, podem considerar additius. Així doncs,

$$\text{CNP} = \text{PPB}_{\text{plc}} - \text{R}_{\text{plc}} + \text{FOD}_{\text{vent}} + \text{FOD}_{\text{hid}} \quad <4.1>$$

on CNP és el canvi net de concentració d'oxigen dissolt a l'aigua, PPB_{plc} la producció primària bruta planctònica, R_{plc} la respiració o consum d'oxigen a la columna d'aigua, FOD_{vent} el canvi de concentració o flux a causa de l'intercanvi difusiu d' O_2 entre aigua i aire, molt influït per l'acció del vent, i FOD_{hid} el canvi de concentració o flux d'oxigen a causa de l'hidrodinamisme (advecció i difusió turbulenta en conjunt). Els primers dos termes són de caire fonamentalment biològic, mentre que els dos últims són de caire purament físic, i tots ells tenen unitats de $\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$, equivalent a $\text{mg l}^{-1} \text{h}^{-1}$ i ppm h^{-1} . Cada terme té el seu signe en funció de si introdueix (+) o extreu (-) oxigen de l'aigua (PPB_{plc} sempre positiva, R_{plc} sempre negativa, i els altres dos termes depèn).

En el nostre treball s'han fet mesures de camp per estimar cada un dels termes de l'equació <4.1>, excepte PPB_{plc} que hem deduït dels altres:

$$\text{PPB}_{\text{plc}} = \text{CNP} + \text{R}_{\text{plc}} - \text{FOD}_{\text{vent}} - \text{FOD}_{\text{hid}} \quad <4.2>$$

En els següents apartats s'expliquen amb més detall:

- les mesures adreçades a estimar la producció i consum d'oxigen a la columna d'aigua en general per a tota la badia dels Alfacs (1^a part: "El plàncton"),
- les referents als processos purament físics, també per a tota la badia dels Alfacs, en general (2^a part: "Processos físics"), i
- les referents a la degradació de la matèria orgànica i el consum d'oxigen associat, tenint en compte la heterogeneïtat espacial de la badia (3^a part: "La degradació de la matèria orgànica").

Posteriorment es presentaran i discutiran els resultats generals que surten de combinar informació de les diferents parts, per tal de poder fer-los servir en el balanç global d'oxigen de l'ecosistema i entendre millor els aspectes relacionats amb la columna d'aigua que afecten la dinàmica d'oxigen dissolt de la badia.

4.1. El plàncton

4.1.1. Introducció

El metabolisme d'oxigen del plàncton és molt important per al balanç d'oxigen dissolt a l'aigua de mar dels ecosistemes aquàtics. La producció fitoplanctònica és una de les fonts d'oxigen dissolt principals en aigües marines (Jørgensen i Richardson 1996). La seva respiració pot ser notable també, generalment superior a la del bentos en sistemes marins costaners amb més de 5 m de fondària (Kemp *et al.* 1992), malgrat en alguns casos ha estat ignorada per als càlculs de balanços d'oxigen a nivell d'ecosistema (Camp *et al.* 1991, Hearn i Robson 2001).

El metabolisme d'oxigen planctònic pot ser estudiat a través de dues grans aproximacions, que comporten dues grans famílies de mètodes. D'una banda l'estratègia reduccionista, a nivell quasi fisiològic, que comporta mètodes directes d'anàlisi; d'altra, l'estratègia d'estudi a nivell d'ecosistema, de caire més holista, i que es fonamenta sobre tot en mètodes indirectes.

Les estimacions directes més emprades són les basades en mesures de metabolisme d'O₂ i CO₂ en ampolles d'incubació clares i fosques (Bender *et al.* 1987), i mesures que fan servir l'isòtop radioactiu ¹⁴C (Steeman-Nielsen 1952, Peterson 1980, Harding *et al.* 1982a, Côté i Platt 1983). També s'han emprat ocasionalment els isòtops estables ¹⁸O (Grande *et al.* 1991), ¹³C (Slawyk *et al.* 1984) i la metodologia de la fluorescència modulada per amplitud de polsos o "PAM-Fluorometry" (Geel 1997). A la badia dels Alfacs, Delgado (1986) va estimar la producció fotosintètica pel mètode del ¹⁴C, fent incubacions de 2 h.

A les aproximacions indirectes (Odum 1956, Welch 1968, Boynton *et al.* 1996, Falck i Gade 1999) s'estima la resultant neta de canvi d'oxigen o de carboni a l'aigua, i després s'analitzen o estimen tots els processos importants que intervenen en els canvis de concentració d'oxigen de la columna d'aigua, per tal d'aïllar el component atribuïble estrictament al fitoplàncton. Val a dir que en sistemes somers, l'intercanvi d'oxigen amb l'atmosfera és, potencialment, un dels processos més importants que hi poden actuar, en la mateixa manera o fins i tot més que el que s'ha descrit per a mar obert (Jørgensen i Richardson 1996). Aquesta aproximació a la producció fotosintètica planctònica a partir de mètodes indirectes permet concentrar l'atenció no tant en els processos aïllats en si relacionats amb la fotosíntesi, de vegades altament variable (e.g. Harding *et al.* 1982b), sinó en el metabolisme d'oxigen del fitoplàncton de forma integrada a nivell de comunitat o ecosistema (Falck 1999). Aquesta aproximació indirecta ha estat l'emprada en el marc de la present tesi.

Així, l'objectiu de la primera secció d'aquest capítol és mostrar els resultats de canvi d'oxigen dissolt a la columna d'aigua (variació entre mínim i màxim), de concentració de clorofil·la a, de la productivitat del fitoplàncton (producció respecte concentració de pigment), i de consum d'oxigen en condicions ambientals controlades. Aquesta informació serà combinada a la secció de resultats generals del

capítol amb les estimacions sobre les magnituds dels processos físics que hi intervenen a la columna d'aigua (2a part), per tal d'estimar la producció neta del plàncton i poder-la fer servir al balanç global d'oxigen de la badia (Capítol 6).

4.1.2. Metodologia

Treball de camp i de laboratori

Els canvis diaris de concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua es van mesurar en algunes de les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua* (Figura 1.2, Figura 1.5), un total de 5 vegades durant els anys 1996 i 1997 en diversos moments del cicle estacional (Taula 4.1). Es van agafar dades de concentració d'oxigen al llarg de perfils verticals (amb un oxímetre WTW model oxi196 acoblat amb un sensor polarogràfic de membrana), efectuant també perfils de salinitat i temperatura (amb un salinòmetre WTW). Es va utilitzar aquí només la mitjana de les concentracions d'oxigen de la capa superficial (dades de 0 a 3 m del perfil de mesura), sense tenir en compte els valors de la capa fonda (per sota de la pycnoclina), atès que els seus valors de concentració d'oxigen estan influïts en major o menor mesura per l'activitat metabòlica de les comunitats bentòniques. Les mesures es van fer cada vegada en tres moments diferents: a mitja tarda, tot just després de la sortida del sol del dia següent, i entre 3 i 10 hores després, la majoria de vegades al capvespre. Aquests moments extrems corresponen de forma aproximada al màxim, mínim i màxim successius de concentració, respectivament.

Per a les mesures de concentració de clorofil·la a i de demanda bioquímica d'oxigen, es van recollir dues mostres de 8 l d'aigua a cadascuna de les tres estacions de mostreig habituals, una per sota i una altre per sobre de la pycnoclina, en un total de 10 ocasions entre juliol de 1997 i setembre de 1998. L'aigua es va agafar amb ampolles Niskin i es va transportar fins a terra en garrafes d'aigua prèviament rentades amb aigua de la mateixa procedència. Per determinar la concentració de clorofil·la a (C_{la}) es va filtrar un volum conegut d'aigua (entre 100 i 500 ml) i es va guardar en total fosc el filtre congelat (filtres de microfibra de vidre Whatman GF/F, 25mm Ø, a -20 °C) fins a la seva posterior anàlisi als laboratoris de l'Institut de Ciències del Mar del *Centre Mediterrani d'Investigacions Marines i Ambientals, del Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, (ICM, CMIMA-CSIC). Per determinar la concentració en pigments es van aplicar 6 ml d'acetona al 90 % al filtre congelat, es van conservar a 4 °C entre 6 i 10 hores en fosc i es van centrifugar durant 15 minuts (Yentsch i Menzel 1963), per mesurar la fluorescència del líquid resultant del procés (fluoròmetre marca Turner Designs, 10-AU-450, Filtre d'excitació a 340-500 nm - pas de banda rodó 5-60 -, Filtre d'emissió >665 nm - tall esmolat rodó 2-64).

El consum d'oxigen de la columna d'aigua es va estimar a través d'incubacions de demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO₅) amb aigua de la mateixa procedència que les mostres anteriors. Val a dir que la mesura de la DBO₅ no és una estima de respiració del plàncton en si mateixa, sinó del consum d'oxigen que es pot donar en un volum d'aigua en aïllar-lo de la resta en fosc, i per tant, inclou la respiració de la comunitat planctònica i d'altres termes, com l'oxidació

d'altres partícules del sèston. Es discuteixen més endavant les limitacions de l'ús de la DBO_5 per estimar la respiració.

Les DBO_5 es van realitzar a dues temperatures controlades (15 i 25°C, aprox.). La concentració d'oxigen inicial és va mesurar a cada ampolla d'incubació immediatament després d'haver introduït la mostra d'aigua, amb un oxímetre WTW model oxi196. La concentració final es va determinar de la mateixa manera en acabar-se el període d'incubació. Les ampolles eren de vidre de coll i tap esmerilat, de 330 ml i van ser embolicades amb paper d'alumini per tal de mantenir-les en fosc.

Tractament de les dades

Per a les estimes relacionades amb els canvis diaris de concentració d'oxigen es va considerar el cicle diari dividit en dues parts: la diürna (entre mínim d'un dia i màxim del mateix dia) i la nocturna (entre màxim d'un dia i mínim de la matinada següent), i per a cadascuna d'elles es va calcular el canvi net d'oxigen.

La demanda d'oxigen de la columna d'aigua, que va ser emprada com a la respiració de la comunitat planctònica (R_{plc}), va ser estimada a la temperatura de camp (t_{camp}) a partir de les DBO_5 mesurades, interpolant entre les dues temperatures experimentals (t_1 i t_2) (Jørgensen i Sørensen 1985):

$$DBO_5(t_{camp}) = DBO_5(t_2) e^{\left[\frac{\ln\left(\frac{DBO_5(t_1)}{DBO_5(t_2)}\right)(t_2 - t_{camp})}{(t_2 - t_1)} \right]} \quad <4.3>$$

essent $t_1 < t_{camp} < t_2$.

4.1.3. Resultats

Canvis nets observats

La concentració d'oxigen a la capa superficial durant els dies de mostreig es va mantenir entre els 7 i els 9 mg l⁻¹ (90 i 130% de saturació, aproximadament), excepte en setembre de 1997 quan es van mesurar valors inferiors als 6 mg l⁻¹ (Taula 4.1; inferior a 80% de saturació). Els increments observats durant el dia van oscil·lar entre els 0.5 i els 1.1 mg l⁻¹ al llarg de 3 a 10 hores, el que va donar uns canvis nets d'entre 0.050 i 0.225 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹. Les concentracions de clorofil·la es van trobar entre 2 i 6 mg m⁻³ en la majoria de casos, si bé tendien a estar en la part baixa del rang. El canvi net d'oxigen dissolt observat a la nit (per tant, decrement) a la badia dels Alfacs va ser d'entre 0.006 i 0.067 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ (valors mitjans en Taula 4.2)

Taula 4.1 Canvi diari de concentració d'oxigen dissolt (OD). Es mostren els OD inicial i final (OD_i i OD_f, respectivament), l'increment d'OD (ΔOD), l'interval de temps considerat (t), el canvi net planctònic (CNP), la concentració de la clorofil·la a (Cl.a), i la productivitat bruta del plàncton (PB_m^{Cl.a})^{vr} del període estudiat.

	Data	OD _i	OD _f	ΔOD	t	CNP	Cl.a	PB _m ^{Cl.a}
		mg O ₂ l ⁻¹			h	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹	mg m ⁻³	mgO ₂ mgCl.a ⁻¹ h ⁻¹
Boca	07-03-97	8.3	8.8	0.5	7.5	0.067	2.96	22.6
	25-04-97	8.3	9.4	1.1	9	0.122	3.71	32.9
	10-06-97	7.8	8.3	0.5	7.5	0.067	2.61	25.7
	08-07-97	8.1	8.0	-0.1	5.5	-	2.25	
Mig	07-03-97	8.8	9.3	0.5	8	0.062	2.98	20.8
	25-04-97	8.4	9.4	1.0	10	0.100	2.34	42.7
	10-06-97	8.2	8.6	0.4	8	0.050	2.2	22.7
	08-07-97	7.8	7.3	-0.5	8	-	2.29	
	17-09-97	7.1	7.7	0.6	3	0.200	5.23	38.2
Cua	18-09-96	6.4	6.9	0.5	6	0.083	2.0	41.5
	07-03-97	8.5	9.6	1.1	7.2	0.153	5.04	30.4
	25-04-97	8.1	8.8	0.7	9	0.077	2.98	25.8
	17-09-97	5.6	6.5	0.9	4	0.225	6.4	35.2

Suposant que el fitoplàncton és l'únic responsable del canvi d'oxigen observat *in situ*, és a dir, que FOD_{fit} i FOD_{var} siguin menyspreables respecte la producció del plàncton.

Taula 4.2 Decrement d'oxigen dissolt (mg O₂ l⁻¹ h⁻¹) mitjà entre la concentració de mitja tarda i la de la matinada del dia següent de totes les dades disponibles per a cada compartiment. Dades procedents del període entre 09/96 i 09/97.

Estació	mitjana	error est.	n
	(mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹)		
Boca sup.	0.014	±0.008	5
Mig sup.	0.020	±0.011	6
Cua sup.	0.032	±0.032	5
Alfacs sup.	0.022	±0.010	16

Consum d'oxigen

Les estimes de DBO₅ de les incubacions al llarg de tot el període de mostreig, corregides per la temperatura de camp, van ser d'entre 0.7 i 4 mg O₂ l⁻¹ (5 d)⁻¹ (Figura 4.1), que en terme mig equival a entre 0.0058 i 0.0333 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹, manifestant en general major variància entre els diferents períodes que entre els diferents punts de mostreig.

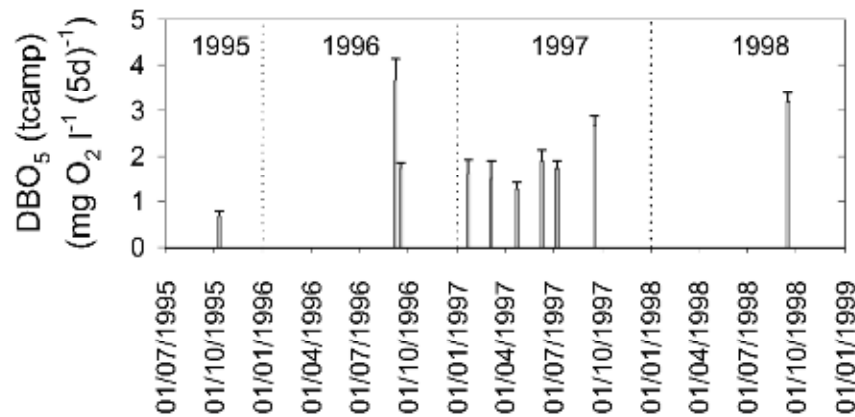


Figura 4.1. Evolució de la demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO₅) mitjana de la badia dels Alfacs, expressada per la temperatura de camp. Les barres d'error corresponen als errors estàndard de les estacions de mostreig de cada incubació (n entre 8 i 10).

En els quatre experiments agafats com a representatius de les estacions climatològiques, la demanda d'oxigen de la columna d'aigua van ser de l'ordre de $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} (5 \text{ d})^{-1}$ a 15°C , i quasi el doble a 25°C , assolint un consum màxim de $2.4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} (5 \text{ d})^{-1}$ a setembre de 1997 (Taula 4.3). Les estimes de la demanda *in situ* (a la temperatura de camp), van oscil·lar entre 0.010 i $0.023 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Taula 4.3 Càlcul de la demanda d'oxigen de la columna d'aigua, per estimar l'ordre de magnitud de la respiració del plàncton (R_{plc}), a partir de mesures de demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO₅), suposant consum constant. Es mostra la temperatura de les dues incubacions i la de camp (t_1 , t_2 , t_{camp} , respectivament), i les seves DBO₅ respectives (DBO₅ t_1 , DBO₅ t_2 , DBO₅ t_c).

Estació	Data	$^\circ\text{C}$			$\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} 5\text{d}^{-1}$			R_{plc} $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$
		t_1	t_2	t_{camp}	DBO ₅ t_1	DBO ₅ t_2	DBO ₅ t_c	
hivern	06/03/97	15,0	25,0	15,40	1,389	2,361	1,419	0,0118
primav.	24/04/97	15,0	25,0	17,29	1,017	1,967	1,182	0,0099
estiu	10/06/97	12,0	25,0	24,51	1,007	1,956	1,908	0,0159
tardor	17/09/97 ¹	16,0	23,5	25,23	1,400	2,400	2,718	0,0227

¹ Totes les dades corresponen a mitjanes de totes les estacions de mostreig de les quals es té dada de la capa superficial per a la data en qüestió, excepte la del 17/09/97, atès que per al càlcul de l'efecte del vent hem exclòs de la mitjana els valors de les estacions boca i mig, ja que momentàniament es trobaven a 100% de saturació d'oxigen i això provocaria estimes nul·les de FOD_{vent} , quan generalment l'aigua es troba sota saturació d'oxigen en aquesta època a causa de les hipòxies de la capa inferior.

4.2. Processos físics

4.2.1. Introducció

Els principals processos físics que afecten la distribució d'oxigen dissolt a l'aigua en ecosistemes marins són advecció horitzontal i vertical, barreja pel vent, difusió turbulenta, i convecció-intercanvi (Svendsen 1997). A les àrees costaneres, l'entrada d'oxigen per processos físics a les aigües superficials és controlada fonamentalment per advecció i intercanvi de masses d'aigua en els eixos vertical i horitzontal (Hagy *et al.* 2000), i per l'intercanvi gasós entre l'aigua i l'aire. L'advecció i l'intercanvi d'aigua verticals estan molt influïts per l'acció del vent. L'advecció i l'intercanvi d'aigua horitzontals estan influïts per les mareas (astronòmiques i baromètriques), les ones estacionàries, l'acció del vent i les corrents (Capítol 1, plana 15 i ss.). L'intercanvi gasós és influït per la velocitat del vent (en qualsevol direcció), la concentració del gas a l'aigua a la superfície, la salinitat i la temperatura.

Per al cas concret de la badia dels Alfacs, ens hem centrat en tots ells menys en l'intercanvi horitzontal, per no ser considerat important en les aproximacions clàssiques de models de caixes per estimar els fluxos advectionals i no advectionals (Officer 1980).

4.2.2. Metodologia

S'ha estimat l'entrada d'oxigen per hidrodinamisme ($M L^{-3} T^{-1}$) a través d'un model de caixes en estat estacionari (Capítol 1, plana 25), que permetia estimar els fluxos advectionals (termes F) i no advectionals (resultant de la suma dels dos termes E entre el mateix parell de compartiments) del patró de circulació entre les caixes (Figura 1.5a). Així, es va multiplicar la suma del flux advectional i no advectional ($L^3 T^{-1}$) d'aigua d'una caixa (estació de mostreig) cap a la següent, per la concentració d'oxigen dissolt ($M L^{-3}$) de la caixa inicial, i dividit pel volum d'aigua de la caixa final (L^3). De forma anàloga s'ha estimat la sortida d'oxigen per hidrodinamisme de cada caixa, i per tant, les resultants netes de flux d'oxigen a causa de l'hidrodinamisme en cada caixa, tenint en compte els fluxos de i a totes les caixes adjacents i a l'hora, els termes advectionals i no advectionals en el mateix terme (FOD_{hid} , en $mg l^{-1} h^{-1}$).

El flux d'oxigen a través de la interfase aire-aigua (FOD_{vent}) ha estat calculat a partir de:

$$FOD_{vent} = k(C_a - C_w) \quad <4.4>$$

on k ($m s^{-1}$) és el coeficient de transferència d'oxigen, C_a ($g m^{-3}$) és la concentració d' O_2 dissolt a l'aigua a 100% de saturació amb l'aire i C_w ($g m^{-3}$) és la concentració d'oxigen dissolt de la capa límit entre l'aire i l'aigua (presa com la concentració que hi ha al compartiment barrejat). El terme FOD_{vent} pot ser positiu (l'oxigen entra a l'aigua) o negatiu (surf de l'aigua), té unitats de $M L^{-2} T^{-1}$ ($g O_2 m^{-2} s^{-1}$), i posteriorment és expressat en $mg O_2 l^{-1} h^{-1}$ en multiplicar-lo per l'àrea superficial de la caixa i dividir-lo pel seu volum, per tal de poder afegir aquest terme al balanç global. Stigebrandt 1991, i Woolf i

Thorpe (1991) van proposar una modificació de la fórmula per incloure un terme extra relacionat amb la entrada d'oxigen a l'aigua a través de la formació de bombolles per acció de les onades, però es va descartar aplicar aquesta variant ja que en la badia dels Alfacs el flux principal és de sortida d'oxigen i no d'entrada, i els resultats, a més, no semblen diferir gaire dels de la fórmula no modificada (Falck i Gade 1999).

La concentració d'oxigen dissolt en aigua en equilibri teòric amb l'aire es pot calcular com (UNESCO 1973):

$$C_s = \frac{32}{22.4} e^{\left[-173.4292 + 249.6339 \left(\frac{T_K}{100} \right) + 143.3483 \ln \left(\frac{T_K}{100} \right) - 21.8492 \frac{T_K}{100} + S \left[-0.033096 + 0.014259 \frac{T_K}{100} - 0.0017 \left(\frac{T_K}{100} \right)^2 \right] \right]} \quad <4.5>$$

on S és la salinitat (psu) de l'aigua junt a l'interfase aigua-aire, T_K és la temperatura absoluta de l'aigua (en Kelvin).

Alguns treballs han emprat com a coeficient de transferència d'oxigen (k) un valor empíric (Inoue 1974, Munekage 1992, Kemp i Boynton 1980, Nixon *et al.* 1986, Camp *et al.* 1991, Kemp *et al.* 1992, Pastres *et al.* 1997), malgrat darrerament ja són més freqüents les fórmules de càlcul que el consideren proporcional a la velocitat del vent (D'Avanzo *et al.* 1996, Olesen *et al.* 1999), a la velocitat del vent i la temperatura (Liss i Merlivat 1986, Norro i Frankignoulle 1996, Falck i Gade 1999), a la velocitat del vent, la temperatura i la salinitat (Hamilton i Herzfeld 2001), o proporcional a una funció combinada del vent i de la velocitat mareal (Lee *et al.* 1991, a partir de la fórmula d'O'Connor-Banks, Thomann i Mueller 1987). El mètode més estès de càlcul de k ha estat el de Liss i Merlivat (1986), però va ser discutit posteriorment per Tans *et al.* (1990) i Wanninkhof (1992), i en el seu lloc aquest darrer autor va proposar la següent formulació:

$$k = 0.31u^2 \left[\frac{Sc}{660} \right]^{-0.5} \quad <4.6>$$

on k aquí es troba en cm h^{-1} , u és la velocitat del vent (m s^{-1}) a l'alçada de 10 m de l'anemòmetre de les estacions meteorològiques, i Sc correspon al *Número de Schmidt*, una mesura de la relació entre la viscositat cinemàtica de l'aigua i la difusivitat molecular del gas a l'aigua. En alguns treballs s'ha calculat Sc com a funció només de la temperatura (Stigebrandt 1991), però aquí s'ha fet servir la funció dependent de la salinitat i temperatura (Hamilton i Herzfeld 2001):

$$Sc = \left(0.9 + \frac{0.1S}{35} \right) (1953.4 - 128.0T + 3.9918T^2 - 0.050091T^3) \quad <4.7>$$

on S és salinitat (psu), i T és temperatura en graus Celsius.

La fórmula de Wanninkhof (1992), que ha estat l'emprat aquí, ha donat estimes de FOD_{vent} superiors a les basades en el model de Liss i Merlivat (1986) en estudis comparatius fets a mar obert (Falck i Gade 1999, Jähne 2001). Marino i Howarth (1993) van constatar experimentalment que FOD_{vent} era particularment pronunciat a estuaris i llacs, que era molt menys influenciat pel vent a mar obert, i van

suggerir que la turbulència superficial en les zones amb més fondària pot trobar-se desacoblada del vent de forma temporal i espacial. Per aquesta raó, aquí s'ha fet servir el mètode de Wanninkhof (1992), ja que la badia dels Alfacs és un sistema estuarià costaner, previsiblement molt influenciat per l'acció de vents recurrents que hi actuen i, a més, per ser el mètode emprat en altres estudis recents tant de sistemes aquàtics costaners (Hamilton i Herzfeld 2001) com fins i tot de mar obert (Skjelvan *et al.* 2001).

Els càlculs per obtenir FOD_{hid} i FOD_{vent} es van fer a partir de mostrejos considerats com a representatius de cada estació climatològica (1 per cadascuna), d'entre els quals es disposava de valors de camp de totes les variables implicades.

4.2.3. Resultats

Les estimes de l'efecte del moviment de l'aigua sobre la concentració d'oxigen (FOD_{hid}) van oscil·lar entre $-0.001 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $+0.070 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Són valors molt baixos, que cal recordar que corresponen només a la capa superficial, molt influïda per l'advecció horitzontal i per les condicions habitualment properes a la normòxia de la capa superficial en contacte amb l'atmosfera. Aquest valor d'entrada ($+0.070 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$) a la capa superficial es va observar el mes de juny de 1997, en que es va donar la gran producció fotosintètica estival al compartiment inferior a causa de l'activitat de les macroalgues bentòniques. Es presenta un resum de dades de la influència de l'hidrodinamisme a la Taula 4.4, per a les dates més representatives de l'evolució anual d'entre totes les que es disposa en que, a més, es tenen mesures de les altres variables que afecten a l'oxigen de la columna d'aigua.

Taula 4.4 Velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial: es mostra l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), i el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}).

Estació	Data	OD %	CNP ¹	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹	
				FOD_{vent}	FOD_{hid}
Hivern	07/03/97	109	0.094	-0.132	-0.001
Primav.	25/04/97	114	0.100	-0.102	+0.001
Estiu	10/06/97	122	0.059	-0.113	+0.070
Tardor	17/09/97 ⁶	91	0.225	+0.091	-0.018

¹ Canvi d'oxigen observat a la columna d'aigua tenint en compte l'oxigen produït pel plàncton i l'oxigen intercanviat amb l'aire i amb els altres compartiments d'aigua del model de caixes.

El flux per aireig del vent (FOD_{vent} , Taula 4.5) va donar uns valors entre $+0.091 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $-0.167 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$. El màxim FOD_{vent} va correspondre al setembre de 1997, en que l'oxigen es trobava per sota de la saturació (91%) i la velocitat mitjana del vent va ser de 3.0 m s^{-1} durant les 4 h de mesura. El mínim FOD_{vent} (màxim flux de sortida) es va estimar el març de 1997, quan l'oxigen es trobava a 112% i el vent a 3.7 m s^{-1} de mitjana durant el període considerat. Val a dir que aquestes mesures de

FOD_{vent} van representar un ordre de magnitud similar al del canvi net d'oxigen de la columna d'aigua o canvi net planctònic (CNP, equació <4.1>, Taula 4.4).

Taula 4.5 Càlcul del flux d'oxigen provocat per l'aireig del vent, FDO_{vent} (segons Wanninkhof 1992). V.v.: velocitat del vent a 10 m d'altura (estàndard de les estacions meteorològiques). i.t.: interval de temps. Sc: Número de Schmidt. K: coeficient de transferència de l'oxigen dissolt.

Data	Sal psu	T °C	O.D. _{tpc} %	O.D. mg O ₂ l ⁻¹	dèficit ¹	V.v. m s ⁻¹	i.t. h	Sc	K m s ⁻¹	FOD_{vent} mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
18/09/96	31,8	21,3	90	6,7	0,7	1,57	5,7	549	0,0222	0,026
07/03/97	35,1	15,0	105	8,6	-0,4	3,69	7,3	763	0,1040	-0,067
07/03/97	34,8	15,5	112	9,1	-1,0	3,69	7,3	741	0,1055	-0,167
07/03/97	34,8	15,3	111	9,1	-0,9	3,69	7,9	752	0,1048	-0,163
25/04/97	35,5	17,6	115	8,9	-1,1	2,65	9,3	667	0,0574	-0,103
25/04/97	35,0	19,1	112	8,5	-0,9	2,65	9,1	617	0,0596	-0,089
25/04/97	35,1	17,7	115	8,9	-1,2	2,65	9,8	661	0,0576	-0,113
10/06/97	34,8	24,5	119	8,1	-1,3	2,21	11,6	477	0,0472	-0,095
10/06/97	35,1	24,7	124	8,5	-1,6	2,21	11,8	474	0,0473	-0,130
17/09/97	36,5	25,3	91	6,1	0,6	3,00	4,2	461	0,0884	0,091
17/09/97	35,5	24,3	108	7,4	-0,6	3,00	3,2	483	0,0864	-0,081

Les dades de salinitat, temperatura, oxigen i velocitat del vent corresponen a mitjanes entre els dos moments de mesura de tot el compartiment superficial en qüestió.

¹ El dèficit d'oxigen s'ha calculat respecte la concentració en mg l⁻¹ corresponent a 100% de saturació amb l'aire.

4.3. La degradació de la matèria orgànica

4.3.1. Introducció

El carboni orgànic a l'aigua de mar apareix en formes dissoltes (carboni orgànic dissolt, COD) i en formes particulades vives o mortes (carboni orgànic particulat, COP). Les concentracions de matèria orgànica dissolta a l'aigua de mar són molt superiors a les de COP: sol haver-hi generalment la relació 100:10:2 entre COD, COP mort i COP viu (Parsons 1963). El COD inclou tota mena de compostos, anant des dels més làbils als més refractaris que perduren llarg temps en dissolució. El COP, per la seva banda, sol estar compostat entre un 40 i un 99% per detritus més els seus fongs i bacteris associats, i, en menor mesura, per fitoplàncton, zooplàncton i bacteris lliures, per ordre d'importància (Valiela 1995).

Aquest marc general pot variar en funció de circumstàncies específiques. Seria d'esperar que la badia dels Alfacs rebés grans quantitats de COP viu i mort, influenciada pels aports de matèria orgànica dels arrossars i llacunes costaneres, que en arribar a condicions de major salinitat, es convertís en COP mort i COD a causa dels processos de descomposició. Aquest tram del cicle del carboni, en que passa de ser constituent des de formes vives en aigües salobres, fins a formes mortes particulades i dissoltes, és molt rellevant en la dinàmica d'oxigen dissolt de la columna d'aigua en els mesos amb menor renovació de les masses d'aigua, que solen ser a l'hora els de major risc d'anòxies. Així, és necessari quantificar cadascuna d'aquestes fraccions de carboni, i identificar el grau responsabilitat que tenen en la demanda d'oxigen de la columna d'aigua.

Per tant, l'objectiu d'aquesta tercera part és presentar unes primeres estimes de canvis en la concentració del carboni orgànic dissolt i particulat en relació a la demanada bioquímica d'oxigen, així com estimar també en quina mesura el COP correspon a poblacions fitoplanctòniques en procés de descomposició.

4.3.2. Metodologia

Per a les mesures de concentració de carboni dissolt i particulat es van fer servir mostres de les tres estacions de mostreig habituals, una per sota i una altre per sobre de la picnoclina. L'aigua es va agafar amb ampolles Niskin i es va transportar fins a terra en garrafes d'aigua prèviament rentades amb aigua de la mateixa procedència. Es van filtrar de 70 a 300 ml d'aigua de mostra amb discs de fibra de vidre (Whatmann - GF/F de 0.45 μm com a mida mitjana de forat de pas) de 22 mm de diàmetre muflats prèviament durant 1 h a 400 °C per eliminar-ne qualsevol carboni orgànic. La fracció de COP es va quantificar a partir del residu recollit al filtre i la fracció de COD, a partir de l'aigua filtrada.

Els filtres per a anàlisi de COP van ser transportats al laboratori, cadascun en un recipient estil "càpsula de Petri" de plàstic amb tapa, prèviament rentada amb àcid clorhídric diluït, i van ser mantinguts en fred fins el pas següent. Per descalcificar les mostres, els filtres eren col·locats sobre un suport foradat a mitja alçada dins una campana de vidre on s'havia introduït àcid clorhídric concentrat i mantinguts 12 h en aquesta atmosfera àcida. Posteriorment, es va canviar l'àcid clorhídric per lleties d'hidròxid sòdic, per tal de neutralitzar els possibles restes d'àcid, i es va deixar de nou tapat durant un mínim d'un dia o fins que els filtres del seu interior estiguessin completament secs. Després, els filtres es van embolicar en discos de 20 mm de diàmetre de làmina d'estany junt amb una petita quantitat de pentòxid de Vanadi (V_2O_5) com a catalitzador per a ajudar a la combustió de la matèria orgànica. La quantitat de carboni total va ser determinada amb un autoanàlitzador elemental Carlo Erba Instruments NA2100 Protein, en els Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona.

Per l'anàlisi de COD es van fer servir recipients de vidre de 33 ml amb taps de plàstic que van ser rentats amb àcid clorhídric diluït primer i amb aigua destil·lada després. Llavors es va muflar els pots durant 1 h a 400 °C, se'ls va embolicar la boca amb paper d'alumini i es van guardar dins contenidors de plàstic hermètics fins a fer-se servir. La introducció de la mostra al pot de vidre es va fer amb l'ajut d'una xeringa de plàstic de 100 ml, prèviament esbandida amb aigua de mostra, a través d'un suport de plàstic que contenia el filtre GF/F 25 mm-0.45 μm de mitjana d'equivalent de forat de pas. Un cop ple es va tapar amb l'ajut d'un quadrat de parafilm prenent cura de que no quedés cap bombolla dins el recipient, i per últim es va col·locar el tap de plàstic per assegurar-ne l'estanqueïtat. Les mostres van ser mantingudes i transportades en fred fins a ser analitzades. L'anàlisi de COD es va realitzar a través del mètode EPA 9060A. Es va acidificar el medi amb àcid clorhídric i bombollejant aire sense carboni per a extreure tot el carboni inorgànic en forma de $\text{CO}_2(\text{g})$. El carboni restant (que estrictament s'anomena "carboni orgànic no purgable") va ser assimilat al carboni orgànic dissolt (COD) i determinat amb un analitzador de carboni orgànic total SHIMADZU TOC5000 als Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona.

Per tal d'avaluar la relació entre el consum d'oxigen i les concentracions de COP i COD, es van realitzar incubacions en ampolles per determinar la demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO_5) d'aigües de diverses procedències (sis punts de mostreig: capa superficial i fonda de les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua*) de les quals es coneixia la concentració inicial de COP i COD. Els experiments es van realitzar amb aigua de mar recollida el 22 de gener de 1997 i el 17 de setembre de 1998, en ambdós casos en incubacions a 15 °C. Les concentracions finals de les dues fraccions de carboni es van mesurar amb el mateix procediment ja descrit però sobre l'aigua de les ampolles de DBO_5 un cop acabada la incubació. La hipòtesi de partida és que la respiració biològica consumeix COP i COD, i per aquesta raó, hauria d'haver una correlació entre la demanda bioquímica d'oxigen i el decrement de les fraccions de carboni. Així, s'ha calculat el consum d'oxigen estimat lligat a consum de COP i COD, transformant aquest a $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, a partir de prendre la relació estequiomètrica entre C:O com a 1:1 molar.

Per estimar la relació entre les concentracions mesurades de clorofil·la a i la de carboni orgànic particulat es van emprar, a més de les dades corresponents als experiments anteriors, fins a 81 parells de mostres de 8 campanyes de mostreig entre 1996 i 1997, amb dades transformades en logaritmes per evitar el pes excessiu de pocs valors extrems de la sèrie sobre la regressió lineal.

Per intentar deduir si aquest fitoplàncton era fotosintèticament actiu, es va calcular la correlació entre la concentració de clorofil·la a i la d'oxigen dissolt, que hauria de sortir en tot cas positiva i significativa estadísticament.

4.3.3. Resultats

Fraccions de carboni i relació amb la DBO

El carboni orgànic de la columna d'aigua es va trobar entre el 57 i el 85 % en forma dissolta (de mitjana per a gener i setembre, respectivament), essent la resta carboni particulat (Taula 4.6).

Les incubacions d'aigua en ampolles tancades durant 5 dies van comportar consum de carboni orgànic dissolt i particulat (Figura 4.2), llevat d'uns pocs casos aïllats en què, probablement a causa d'errors experimentals o de determinació, les concentracions de carboni al final de l'experiment van ser superiors a les del principi.

Els resultats mostren que en general la DBO va estar efectivament relacionada amb el consum de carboni orgànic, tant dissolt com particulat en conjunt, a l'hivern ($r^2=0.51$, $p<0.05$, $n=20$), tot i que analitzant les dues fraccions per separat, només va sortir estadísticament significativa la relació amb el carboni orgànic particulat ($r^2=0.45$, $p<0.05$, $n=10$, Taula 4.7). A finals d'estiu, però, no es va detectar cap relació entre el consum d'oxigen i el consum de carboni orgànic.

La relació estequiomètrica del consum d'oxigen i de carboni és de 0.445 mol d'O₂ respirat per cada mol de C orgànic consumit a l'hivern (a 15 °C, $n=10$). Gràficament s'observa que la demanda bioquímica d'oxigen està relacionada amb el consum de COD i COP, tret d'alguns punts, que procedeixen de l'estació de *Cua*, tant superficial com al fons (Figura 4.2).

Taula 4.6. Concentració de carboni orgànic dissolt (COD) i carboni orgànic particulat (COP) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs en gener de 1997 i setembre de 1998. Els codis corresponen als del llistat de la Figura 4.2.

Estació	COD (mg C/l)	COP (mg C/l)	COD (%)	COP (%)
Gener de 1997				
boF	0.850	0.956	47	53
miF	0.672	0.551	55	45
cuF	1.313	2.466	35	65
cuS	1.228	0.847	59	41
miS	1.730	0.688	72	28
boS	1.221	1.126	52	48
PNc	1.544	3.049	34	66
PNm	1.686	0.553	75	25
PNb	1.490	0.750	67	33
PS	1.371	0.473	74	26
<i>mitjana</i>	<i>1.31</i>	<i>1.15</i>	<i>57</i>	<i>43</i>
<i>error est.</i>	<i>0.1</i>	<i>0.3</i>	<i>4.8</i>	<i>4.8</i>
Setembre de 1998				
boF	2.79	0.899	76	24
miF	2.78	0.655	81	19
cuF	6.06	0.382	94	6
cuS	4.95	0.485	91	9
miS	2.84	0.487	85	15
boS	1.95	0.406	83	17
PNc	2.17	0.297	88	12
PNm	2.57	0.773	77	23
PNb	2.56	0.365	88	12
PS	3.90	0.387	91	9
<i>mitjana</i>	<i>3.26</i>	<i>0.514</i>	<i>85</i>	<i>15</i>
<i>error est.</i>	<i>0.4</i>	<i>0.1</i>	<i>2.0</i>	<i>2.0</i>

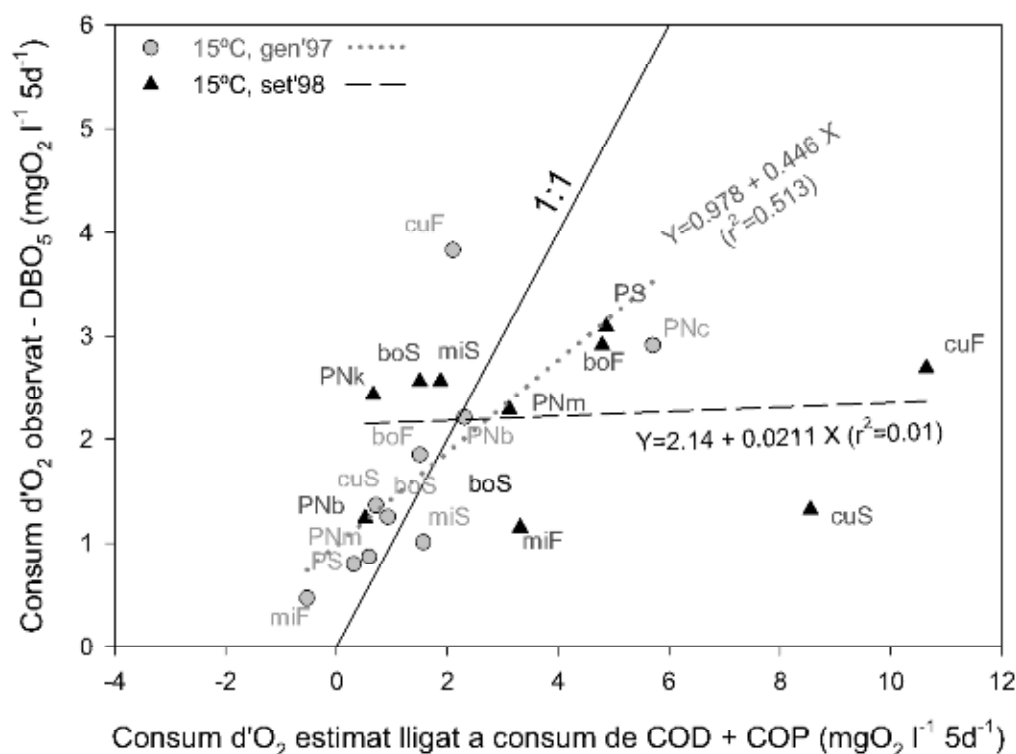


Figura 4.2. Relació entre consum d'oxigen dissolt (OD) estimat per consum de carboni orgànic dissolt (COD) més particulat (COP) assumint relació estequiomètrica C:O com a 1:1, i la respiració observada per la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO₅). Les sigles mostrades corresponen a les estacions de mostreig exterior fons (exF), boca fons (boF), mig fons (miF), cua fons (cuF), cua superficial (cuS), mig sup. (miS), boca sup. (boS), exterior sup. (exS), plataforma nord cua (PNC), plataforma nord mig (PNm), plataforma nord boca (PNb), i plataforma sud (PS).

Taula 4.7 Correlacions parcials entre consum d'oxigen dissolt (OD), estimat a través del canvi de concentració del carboni orgànic dissolt (COD) més carboni orgànic particulat (COP), i a través de la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO₅) observada. S'ha assumit la relació estequiomètrica molar entre carboni i oxigen de 1:1. Incubacions a 15 °C.

	Consum d'OD per Δ de: Mes i Temp (°C)	DBO ₅	
		r ²	p
COD	Gener	0.098	0.272
	Setembre	0.0156	0.739
	Totes	0.135	0.111
COP	Gener	0.454	0.037**
	Setembre	0.065	0.503
	Totes	0.155	0.089*
COD+COP	Gener	0.513	0.020**
	Setembre	0.010	0.787
	Totes	0.167	0.074*

Totes les correlacions s'han realitzat amb n=10, i les significatives s'han ombrejat i marcat amb asteriscos segons el nivell de significació: p<0.1, en gris clar i un asterisc (*), i p<0.05, en gris fosc i amb doble asterisc (**).

Clorofil·la a vs. carboni orgànic particulat i oxigen dissolt

El carboni orgànic particulat i la concentració de clorofil·la a van presentar una correlació estadísticament significativa (Figura 4.3a). Estudiant la mateixa correlació per estacions climatològiques, s'observa que només va ser significativa a l'estiu (Figura 4.3d). Es va treure d'aquesta anàlisi les dades de la primera campanya de mostreig, atès que van donar uns resultats anòmalament baixos de clorofil·la a i anòmalament alts de COP, per l'època de l'any en que es va mesurar i s'atribueix a algun error de mostreig inicial (cercles blancs del gràfic Figura 4.3a, d). La concentració d'oxigen dissolt i la concentració de clorofil·la a es van correlacionar negativament, encara que amb un baix coeficient de determinació ($p < 0.05$, $r^2 = 0.11$, Figura 4.3f). En aquest cas, per estacions, la correlació només és significativa a l'hivern, a on, a més, és positiva, (Figura 4.3g).

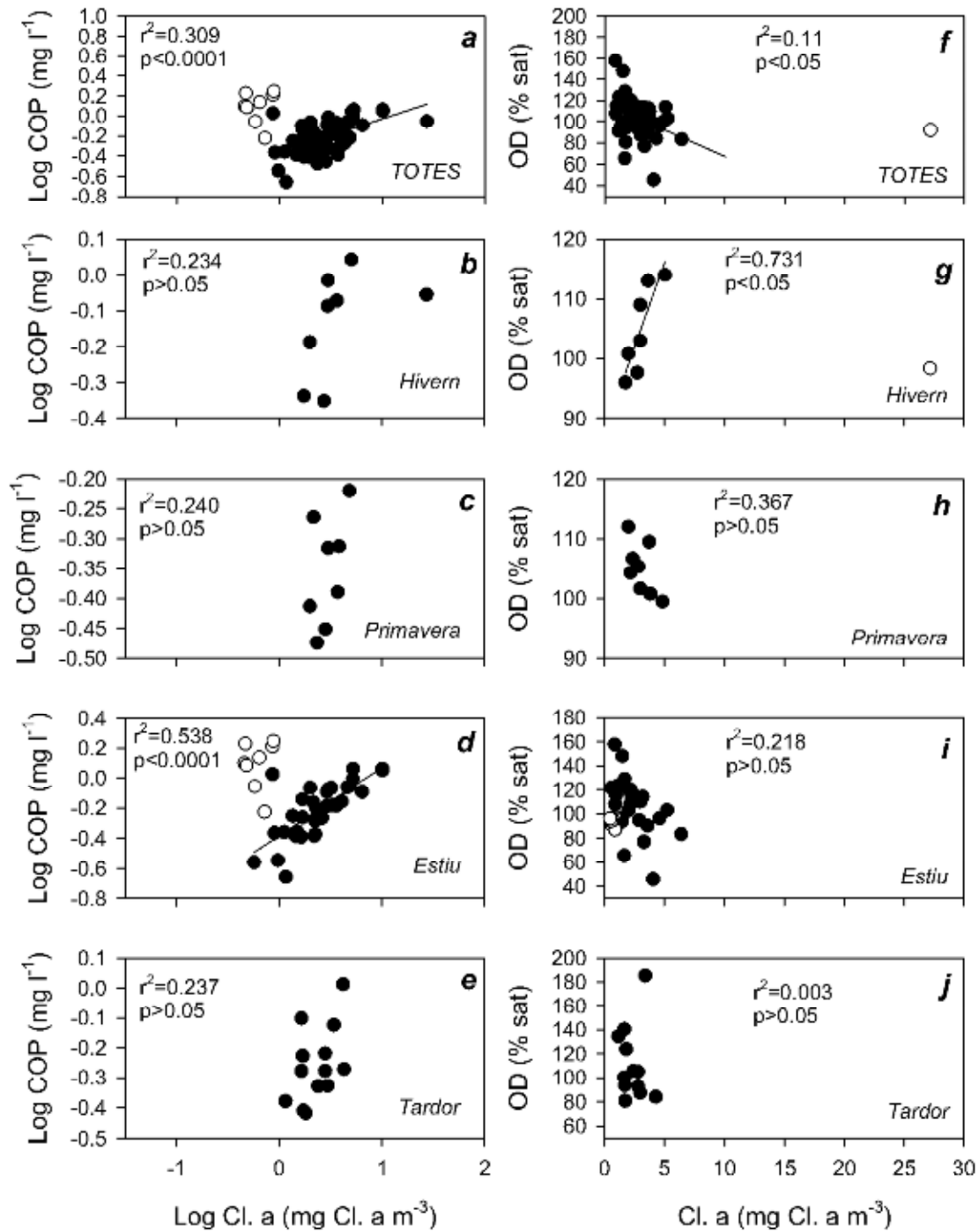


Figura 4.3. Regressions lineals entre la concentració de clorofil·la a (Cl.a) i (a-e) la de carboni orgànic particulat (COP) en escala doble logarítmica, o (f-j) entre Cl.a i la concentració d'oxigen dissolt. (a, f) totes les dades, (b, g) hivern, (c, h) primavera, (d, i) estiu, (e, j) tardor. Els cercles blancs corresponen a valors fora de rang o "outliers" (veure text per més detalls).

Resultats generals

Producció Bruta del Plàncton

Per estimar la producció bruta del plàncton s'han escollit els conjunts de dades de les campanyes de cada estació climatològica més adequats en cada cas, descartant aquelles en què certs processos podien produir un biaix important dels resultats. Per exemple, per estudiar la productivitat del fitoplàncton de la capa superficial s'han agafat les dades de les campanyes amb el menor intercanvi vertical de masses d'aigua (per reduir el biaix per entrada d'oxigen dissolt produït pels productors primaris de la capa de fons). Això ha estat a causa de les poques rèpliques estacionals dels valors de cada variable i la seva heterogènia distribució temporal i espacial. En cada taula de resultats s'indica la campanya o mes de mostreig del qual procedeixen les dades.

Taula 4.8 Estimes de producció bruta del plàncton (PPB_{plc}), velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial i percentatges parcials relatius a la PPN_{plc} (% PPN_{plc}). Les altres variables mostrades són l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}), la producció primària neta del plàncton (PPN_{plc}), la respiració del plàncton (R_{plc}). Les últimes tres columnes fan referència al percentatge de la PPN_{plc} que significa el valor de flux a causa del vent (Vent), hidrodinamisme (Hid) i respiració del plàncton (R).

Estació	Data	OD	CNP ¹	FOD _{vent}	FOD _{hid}	PPB _{plc} ²	R _{plc} ³	PPN _{plc} ⁴	Vent	Hid.	R	
		%	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹					% PPN _{plc} ⁵				
Hivern	07/03/97	109	0.094	-0.132	-0.001	0.227	0,0117	0.215	(-)	61	0	(-) 5
Primav.	25/04/97	114	0.100	-0.102	+0.001	0.201	0,0093	0.192	(-)	53	0	(-) 5
Estiu	10/06/97	122	0.059	-0.113	+0.070	0.102	0,0150	0.087	(-)	130	(+)	80 (-) 17
Tardor	17/09/97 ⁶	91	0.225	+0.091	-0.018	0.152	0,0225	0.130	(+)	70	(-)	14 (-) 17

¹ Canvi d'oxigen observat a la columna d'aigua tenint en compte l'oxigen produït pel plàncton i l'oxigen intercanviat amb l'aire i amb els altres compartiments d'aigua del model de caixes.

² Velocitat de canvi de la producció bruta del fitoplàncton, calculada com $PPB_{plc} = \text{Canvi Net Planctònic} - FOD_{vent} - FOD_{hid}$.

³ Estimada a partir de la DBO₅ i assumint consum d'oxigen lineal amb el temps.

⁴ Producció neta del plàncton, calculada com $PPN_{plc} = PPB_{plc} - R_{plc}$.

⁵ El signe correspon a si ha estat un efecte de treure una part de l'oxigen de la PPB_{plc} (-) o bé afegir-ne (+)

⁶ S'ha considerat no la mitjana de les dues dades del 17/09/97 sinó tan sols la corresponent a l'estació Cua, atès que la mitjana de concentració d'oxigen dissolt és justament 100%, el que no donaria idea del flux possible a través de la interfase que estaria existint. Per aquesta raó hem considerat els valors de Cua, amb 90% de saturació d'O.D., per tal de tenir una idea de l'ordre de magnitud de l'entrada d'oxigen via atmosfèrica en una situació perfectament possible per aquesta època de l'any.

Utilitzant l'equació <4.2>, s'estima que la producció primària bruta del plàncton (PPB_{plc}) es situa entre 0.102 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ el juny i els 0.227 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ a principis de març per a la capa superficial (Taula 4.8). La respiració, entre 0.0093 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ en primavera i 0.225 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ a la tardor; i la producció neta resultant oscil·la entre 0.087 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ a l'estiu i 0.215 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹ a l'hivern. En expressar aquests i altres valors de la Taula 4.4 en percentatges respecte la producció neta en aquesta Taula 4.8, s'obté que la respiració del plàncton es situa entre el 5 i el 17 % de la PPN_{plc} . El

vent generalment provoca un flux d'oxigen cap a l'atmosfera que oscil·la entre el 53 i el 130 % de PPN_{pic} , excepte en la situació d'hipòxia de 1997, en que els dèficits d'oxigen van causar un intercanvi net d'oxigen en direcció a l'aigua en una quantitat equivalent al 70% de la producció neta planctònica. L'hidrodinamisme té una contribució pràcticament nul·la durant el període de canals tancats, si bé durant la resta de l'any, l'hidrodinamisme pot introduir oxigen a la capa superior de l'ordre d'un 80 % de la PPN_{pic} local a l'estiu, en que la producció local del plàncton és mínima i la producció del bentos és màxima (i l'aigua porta l'oxigen produït de la capa inferior). Finalment, durant l'època de les hipòxies a la capa de fons, l'hidrodinamisme pot fer disminuir la concentració d'oxigen a la capa superficial en una quantitat equivalent al 14 % de la producció neta planctònica superficial; paral·lelament, l'hidrodinamisme pot fer augmentar l'oxigen dissolt a la capa de fons en una quantitat equivalent al 8 % de l'anterior PPN_{pic} .

Les estimes de productivitat planctònica bruta d'oxigen per unitat de clorofil·la a es van situar entre 27.3 i 69.8 $mg O_2 (mg Cl.a)^{-1} h^{-1}$ (Taula 4.9).

Taula 4.9 Productivitat del plàncton ($PB_m^{Cl.a}$ i $PN_m^{Cl.a}$), a partir d'estimes de producció bruta (PPB_{pic}) i neta (PPN_{pic}), respectivament, i la concentració de clorofil·la a (Cl.a), per a cada estació climatològica.

Estació	Data	PPB_{pic}	PPN_{pic}	Cl.a	$PB_m^{Cl.a}$	$PN_m^{Cl.a}$
					$mg O_2$	$mg O_2$
		$mg O_2 l^{-1} h^{-1}$	$mg O_2 l^{-1} h^{-2}$	$mg m^{-3}$	$mg Cl.a^{-1} h^{-1}$	$mg Cl.a^{-1} h^{-2}$
hivern	07/03/1997	0.227	0.215	3.66	62.0	58.7
primav.	25/04/1997	0.201	0.192	3.01	66.8	63.8
estiu	10/06/1997	0.102	0.087	2.16	47.2	40.3
tardor	17/09/97 ¹	0.152	0.13	6.4	23.8	20.3

¹ A l'igual que en taules anteriors, s'ha considerat no la mitjana de les dues dades del 17/09/97 sinó tan sols la corresponent a l'estació Cua.

Discussió general

Estimes de producció i productivitat del fitoplàncton

Hi ha una certa discrepància entre els únics valors de producció fitoplanctònica existents per a la badia dels Alfacs calculats amb un mètode directe, i els resultats mostrats en aquest capítol, calculats amb un mètode indirecte. L'any 1984 es van realitzar incubacions *in situ* amb ^{14}C de mostres naturals de fitoplàncton (no concentrades) durant dues hores (Delgado 1986). Aquestes mesures fetes a superfície donaven unes produccions d'entre 5.77 i 11.63 $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ en els mesos de març, juliol i octubre a nivell de la zona més profunda de la badia dels Alfacs, que equivaldrien a 0.0154 i 0.0310 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (assumint relació molar de 1:1 entre CO_2 i O_2). En el present treball, en canvi, s'han obtingut uns valors de PPN_{pic} entre 0.059 i 0.225 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Taula 4.4), i de PPB_{pic} entre 0.102 i 0.227 $\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Taula 4.8), entre 4 i 7 vegades per sobre que els anteriors. Convé recordar que el mètode del ^{14}C dona valors que es troben entre la producció neta i la producció bruta (Peterson 1980, Bender *et al.* 1987); per a incubacions suficientment curtes hauria de ser força ajustada a la PPB_{pic} (Collos *et al.* 1993), però en alguns casos d'incubacions de 2-3 h amb ^{14}C , s'ha arribat a descriure que els resultats eren un ordre de magnitud inferiors (Cole *et al.* 1991, Cole *et al.* 1992, Howarth *et al.* 1996). D'altra banda, les mesures basades en mostres d'aigua incubades en ampolles poden subestimar de forma severa la producció primària bruta i respiració a estuaris (Swaney *et al.* 1999), especialment en aigües tèrboles i profundament barrejades. Segons aquests darrers investigadors, la mesura del metabolisme a partir de canvis *in situ* en la concentració d'oxigen dissolt sobre un cicle diari, com hem fet aquí, ofereix una solució potencial a aquests problemes.

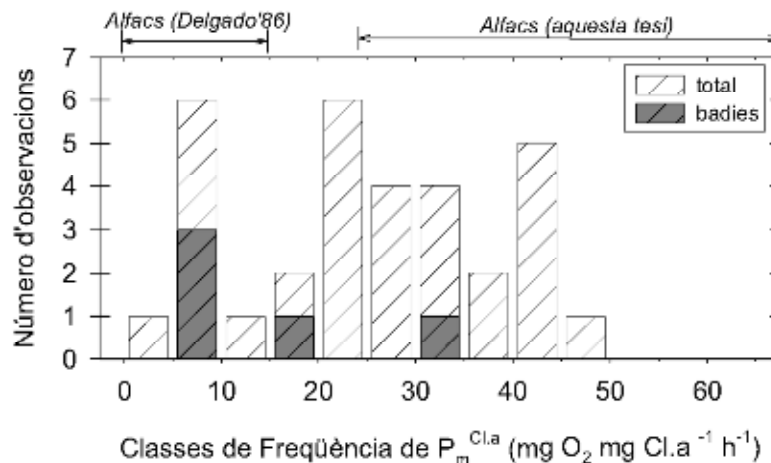


Figura 4.4. Productivitat mitjana del fitoplàncton ($P_m^{\text{Cl.a}}$, en $\text{mg O}_2 \text{ mg Cl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$) de diferents sistemes marins costaners, fonamentalment llacunes (total de les barres ratllades). S'assenyalen en gris els que corresponen a badies. A partir de Nixon (1986); cal tenir en compte que fins els anys 80 la majoria dels estudis es feien a partir d'incubacions amb ^{14}C .

Tanmateix, la productivitat del plàncton ($P_m^{\text{Cl.a}}$) també mostra discrepàncies lògicament (donat que la concentració de clorofil·la a no ha canviat molt), d'un ordre de magnitud entre les mesures anteriors amb ^{14}C (entre 1.87 i 5.12 $\text{mg O}_2 \text{ mg Cl.a}^{-1} \text{ h}^{-1}$, Delgado 1986) i les actuals per aquest mètode

indirecte (entre 20.3 i 63.8 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹, per a productivitats netes, i una mica superiors per a les brutes; Taula 4.9). Nixon (1986) va recopilar dades de producció planctònica i clorofil·la a d'una varietat de sistemes marins costaners d'arreu del món (fonamentalment llacunes costaneres i badies), estimades la major part amb la tècnica de ¹⁴C (i per tant, amb produccions entre les netes i les brutes). Els resultats d'aquest estudi, tret d'excepcions, es troben inclosos al tercer i quart quartils de la distribució de la seva compilació de dades (Figura 4.4). Així, els valors de P_m^{Cla} obtinguts en el present treball són relativament alts però es troben perfectament dins l'ordre de magnitud observat en la bibliografia i els seus rangs de variació (Taula 4.10). I més concretament, també ho fan les taxes de producció per unitat de clorofil·la a descrites en altres indrets per a taxa similars.

Aquestes afirmacions són vàlides tant si tenim en compte la contribució del vent i de l'hidrodinamisme com si no. I això ho sabem per que en calcular també la productivitat a partir de l'equació <4.2> però ometent FOD_{vent} i FOD_{hid}, aquesta nova P_m^{Cla} de referència, no conté la influència de les estimes de la contribució del vent, hidrodinamisme, ni respiració, i es situa al voltant de 38.2 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹ (Figura 4.5), encara un ordre de magnitud per sobre de les productivitats estimades amb el ¹⁴C. Aquesta mateixa estima de l'ordre de magnitud de P_m^{Cla} a través de CNP realitzada en altres sistemes va ser de 5.3 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹ (r²=0.63, p<0.01, n=59) a badies costaneres de Maryland, EUA (Boynton *et al.* 1996) i entre 18 i 27 mgO₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹, per a CNP+R, a l'estuari Choptank de la badia de Chesapeake, EUA (considerant un fotoperíode de 10 h aplicat sobre els resultats de la Figura 4.6, a partir de Petersen *et al.* 1998).

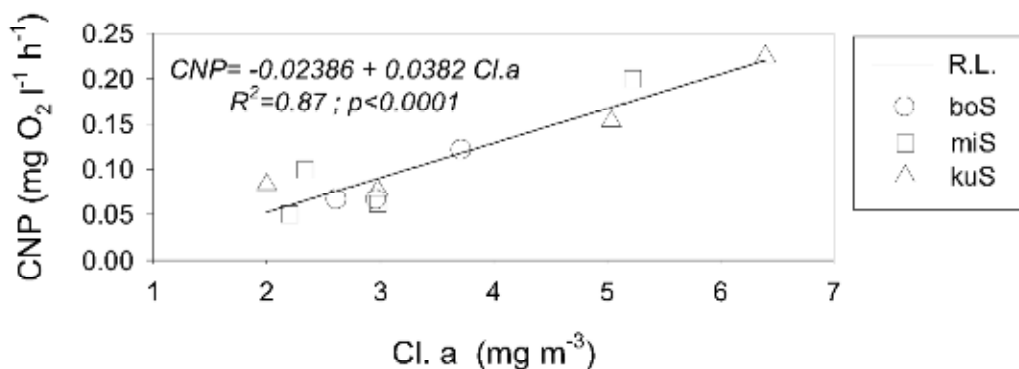


Figura 4.5. Canvi net d'oxigen del plàncton (CNP) diari a la capa superior, per compartiments. **Llegenda:** boS, miS, cuS representen els compartiments superficials de les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua*, respectivament. Es mostra també l'equació de la regressió lineal (R.L.) entre ambdues variables.

Per altra banda, tot i semblar improbable, no es pot descartar que les discrepàncies observades responguin a un canvi real en el funcionament de la comunitat fitoplanctònica. Per exemple, el clima lumínic a la columna d'aigua a finals dels 90 va mostrar una major radiació global respecte mitjans dels anys 80, de quan es disposen dades (Capítol 1, plana 76). Aquesta diferència en la llum incident sobre el fitoplàncton podria haver estat produïda a molts nivells diferents i de diferent ordre

d'importància (Harding *et al.* 1987), essent un d'ells la terbolesa. L'aigua podria ser més tèrbola ara que abans, malgrat no es té cap suport experimental per sostenir aquesta hipòtesi. O podria ser, hipotèticament, que una major circulació de Langmuir mediada pel vent permetés a les cèl·lules del fitoplàncton fotoinhibir-se menys, a causa de romandre-hi menor temps en la superfície de la columna d'aigua (Macedo *et al.* 1998), o a causa d'altres efectes associats a la turbulència (Petersen *et al.* 1998, Olesen *et al.* 1999).

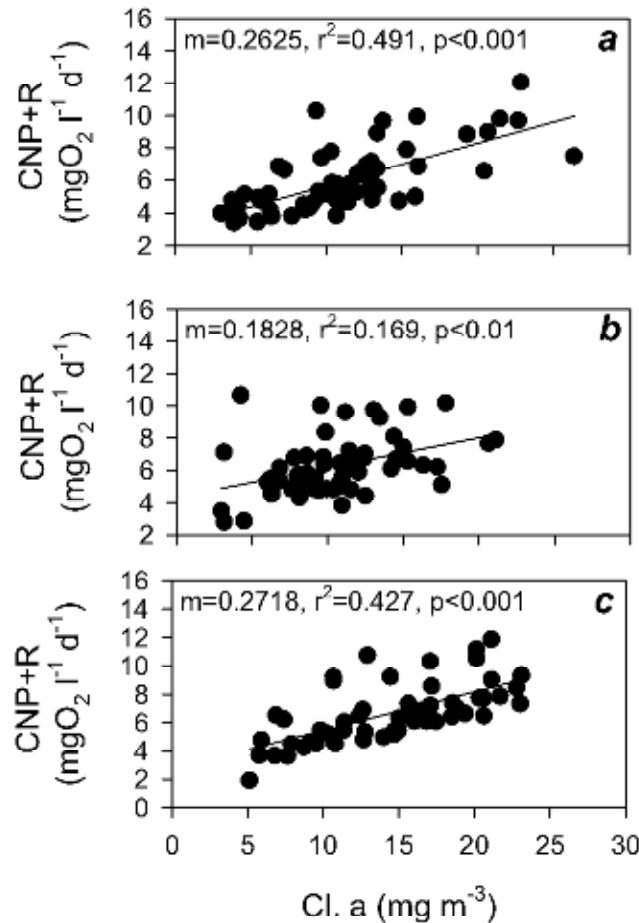


Figura 4.6. Relació entre la suma de la velocitat de canvi net planctònic d'oxigen més la respiració (CNP+R, en $\text{mgO}_2 \text{l}^{-1} \text{d}^{-1}$) i la clorofil·la a (en mg m^{-3}), en experiments de mesocosmos amb tres graus de turbulència: (a) baixa, (b) mitja i (c) alta. m =pendent de la recta. Elaborat a partir de dades de Petersen *et al.* (1998).

En qualsevol cas, se sap que les reduccions en la irradiància incident, tant a escala espacial, o temporal diària o estacional, poden fer que augmenti la productivitat del fitoplàncton respecte la clorofil·la a, o la seva eficiència fotosintètica⁹, per valors similars de productivitat. És previsible que els sistemes somers, com la badia dels Alfacs, rebin irradiàncies superiors a les de saturació de tot o gran part del seu fitoplàncton, com a mínim, en les hores de màxima elevació solar. I el fitoplàncton disminueix la seva eficiència fotosintètica a altes irradiàncies (Falkowski 1980, Yentsch 1980, Prézélin 1981). Així s'ha observat en la badia de Chesapeake en repetides ocasions, en que la seva màxima

⁹ productivitat per unitat d'irradiància, $\text{mg O}_2 \text{mg Cl. a}^{-1} \text{h}^{-1} \mu\text{mol fotons}^{-1}$

productivitat no és al migdia sinó a mig matí o mitja tarda (Harding *et al.* 1982a), i en una escala de variació estacional la seva màxima taxa d'eficiència fotosintètica per unitat de productivitat (el quocient entre pendent inicial de les corbes fotosíntesi – irradiància i P_m^{Cla}) es dona al març, mentre que els mínims anuals són al juny (Harding *et al.* 1986). La variació en fondària de la taxa d'eficiència fotosintètica respecte P_m^{Cla} a l'estiu mostra que és cinc vegades superior sota la piconclina que a la capa superficial (Harding *et al.* 1985). Així, qualsevol factor que fes disminuir lleugerament la irradiància incident a la badia dels Alfacs (Figura 4.7c) produiria un cert augment de la producció fitoplanctònica de la capa superficial, a través d'increments en la seva productivitat o en la seva eficiència fotosintètica. En aquesta línia, s'ha observat que als mesos d'estiu les produccions brutes i netes del plàncton són les més baixes de l'any (Taula 4.4), tot i la gran transparència relativa de l'aigua (Figura 2.4), el que referma la hipòtesi anterior.

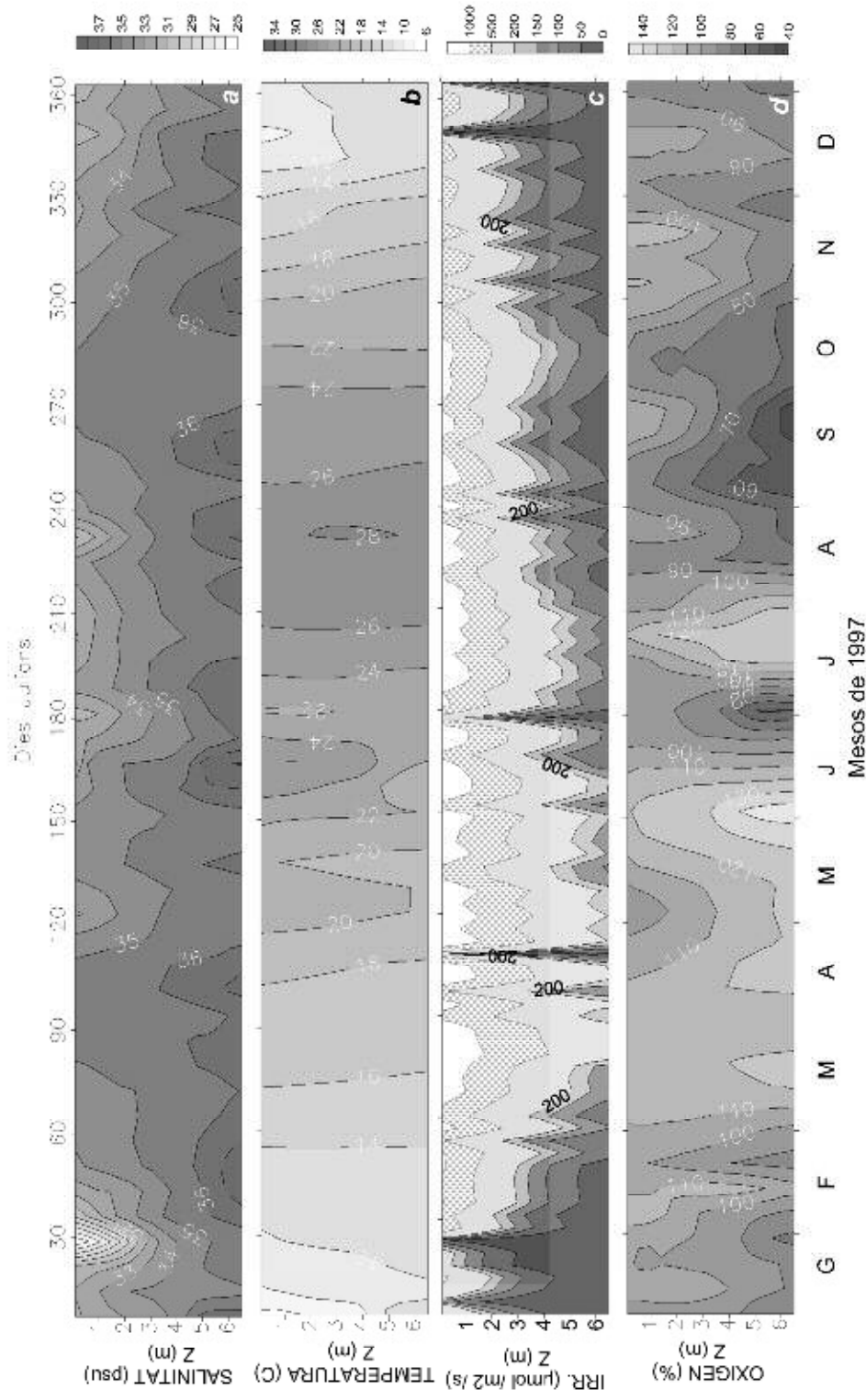


Figura 4.7. Perfils en fondària de (a) salinitat, (b) temperatura, (c) irradiància subaquàtica, i (d) oxigen dissolt, en el punt central dels Alfacs al llarg de 1997. Dades de (a), (b) i (d) ja mostrades a la Figura 2.18, i les de (c) han estat calculades a partir de la metodologia explicada al Capítol 1. Les marques dels eixos d'abscisses corresponen a mesos de 30 dies.

Taula 4.10 Recull de productivitats del fitoplàncton (P_m^{Cla}), convertides¹ a mgO_2 ($mg\ Cl_a$)⁻¹ h⁻¹. Les produccions descrites en els treballs (Prod.) fan referència a produccions netes (N), brutes (B) o sense especificar en la referència ("?"), així com també ha passat amb la descripció del metodologia, que no ha pogut ser esbrinada en tots els casos ("?").

Llocs	P_m^{Cla}	Prod.	Mètode	Font
Ordre de magnitud general per a la productivitat màxima	25-50	N	Bibliog	Thomann i Mueller 1987
Diversos	0.53-45.3			Lalli i Parsons 1993
Canal de la Mànega (<i>sobre (sota picnoclina)</i>)	5.07-15.2 0.53	N N		Pingree <i>et al.</i> 1975
Canal de Santa Bàrbara, CA., Badia de San Francisco, CA.,	5.01-65.3 5.2-10.5	N-B	¹⁴ C, 2 h	Harding <i>et al.</i> 1982a Cloern 1979
Cubeta de Bedford, Nova Escòcia, Canadà	3.8-33.5 5.4-22.3		¹⁴ C, 3 h	Harrison i Platt 1980 Côté i Platt 1983
Badia Chesapeake, E.U.A.	2.67-32.0 5.34-18.7	N-B N	¹⁴ C, 2 h ¹⁴ C, 4-6 h	Harding <i>et al.</i> 1985 Boynton <i>et al.</i> 1997
Badia Narragansett, R.I., E.U.A.	9.5			Durbin <i>et al.</i> 1975
Tancs de cultiu. Rhode Island, E.U.A.	7.39-15.6 5.29-11.7	N	Canvi diari, mesocosmos O ₂ -Winkler	Bender <i>et al.</i> 1987
Strangford Lough, Irlanda del Mar del Nord	0.75-69.9 2.73-122			Savidge 1988 Riegman i Colijn
Estuari de Schelde, Països	1.71-64.2			Kromkamp i Peene
Riu Choptank, subestuari de la badia de Chesapeake, E.U.A.	1.7-14.8	N	¹⁸ O	Lewitus i Kana 1995
Estuari de Tagus, Portugal, U.E.	32.6-123.9	N	O ₂ -Winkler	Macedo <i>et al.</i> 1998
Badia dels Alfacs, Espanya, U.E. Total la badia; (<i>només cubeta</i>)	1.87-13.0 (1.87-5.12)	N-B	¹⁴ C, 2 h	Delgado 1986
A partir de canvis diaris de concentració d'O ₂ . Només cubeta.	21-43 (38) ² 23.8 - 66.8 20.3 - 63.8	CNP ³ B ⁴ N	canvi diari <i>in situ</i>	Aquesta tesi

¹ Els valors en $\text{mg C (mg Cl a)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ s'han convertit assumint que tot l'oxigen produït en la producció primària ha comportat fixació de carboni, i per tant, s'ha multiplicat pel factor 32/12 de la relació estequiomètrica de entre els C-CO₂ i l'O₂ de la fotosíntesi, sempre que no s'indiqués altre mètode.

² Valor estimat a partir de la regressió lineal amb tots els punts vàlids.

³ Per a aquest càlcul es va prendre que el tot l'increment observat en la concentració d'oxigen en un dia és degut només a la producció del fitoplàncton; és a dir, que FOD_{hid} i FOD_{vent} són menyspreables respecte la producció del plàncton.

⁴ Per al càlcul de la velocitat de canvi de la producció bruta (PPB_{net}) ja s'ha inclòs l'efecte de l'hidrodinamisme i del vent a més de la respiració del plàncton.

Estimes de la respiració del plàncton

S'ha observat que el mètode de la DBO₅ per calcular un valor de referència de respiració de la columna d'aigua, assumint velocitat de consum d'oxigen constant¹⁰ (Taula 4.3, mitjana de 0.015 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹), dóna una resultat que no dista gaire del decreixement d'oxigen nocturn mitjà de la columna d'aigua (Taula 4.2, mitjana de 0.022 mg O₂ l⁻¹ h⁻¹). D'aquests dos, el mètode de les incubacions de DBO dóna valors aproximats de respiració, mentre que el segon mètode mesura directament el canvi de concentració d'oxigen a causa de la respiració planctònica nocturna més a causa del flux d'oxigen mediat pel vent i per l'hidrodinamisme, i en alguns estudis ha estat pres com la respiració del plàncton (Petersen *et al.* 1998, Caffrey 2003). Si bé no s'ha pogut mesurar la respiració amb detall, s'ha pogut comprovar que el mètode emprat d'assignar la DBO_n a la respiració dóna resultats del mateix ordre de magnitud als que provenen de les mesures directes de davallades nocturnes d'oxigen dissolt a la columna d'aigua (fonamentalment per respiració planctònica, però no només), en la línia d'altres treballs en sistemes marins costaners (Witek *et al.* 1999). Per aquesta raó, s'assumeix la validesa del mètode emprat en aquesta tesi per deduir el valor de la respiració planctònica en la badia dels Alfacs.

Flux d'oxigen a causa del vent

La badia generalment exporta oxigen cap a l'atmosfera, en petites quantitats quan no hi ha vent, i amb fluxos majors quan el vent actua. Els resultats obtinguts de velocitat de canvi d'oxigen a causa de l'intercanvi amb l'atmosfera (Taula 4.4) s'assemblen molt a les estimes d'altres treballs en badies estuarianes, com la badia d'Uranouchi, al Japó (plana 330), en que s'estima que un 60% de l'oxigen produït marxa cap a l'atmosfera entre primavera i tardor (Munekage 1992). Altres estudis similars fets a la badia de Narragansett (EUA) van mostrar, a partir també d'un model de caixes, que variacions en la velocitat d'intercanvi gasós aire-mar tenen un efecte molt petit (<10%) sobre la concentració d'oxigen dissolt de la capa superficial del seu sistema, i que això no tenia cap efecte significatiu sobre l'oxigen de la capa profunda (Kester *et al.* 1996).

Més enllà de les estimes puntuals fetes (Taula 4.4), podem fer una aproximació al flux anual causat pel vent (FOD_{vent}) basant-nos en la distribució de valors de concentració superficial d'oxigen dissolt i en la distribució de velocitats del vent, per a una salinitat i temperatura de l'aigua donades (Figura

¹⁰ Com en cap de les nostres incubacions de DBO₅ no es va esgotar l'oxigen dissolt, cap mostreig de DBO va coincidir amb blooms de fitoplàncton, i quedava molt carboni orgànic en finalitzar les incubacions, vam assignar el valor horari de DBO a la respiració planctònica, considerant un consum constant al llarg dels cinc dies.

4.8). Si agafem aigua de 35 psu de salinitat i 20 °C com una possible de referència a partir dels valors observats al llarg de l'any (Figura 4.7a, b, respectivament), els valors de FOD_{vent} es situen entre propers a zero quan només hi ha un 101 % de saturació d'oxigen a l'aigua, i els 4.6 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$ quan l'oxigen estigués a 140 % de saturació (com va haver de mitjana a l'estació Cua superficial els estius de 1997 i 1998, dades no mostrades) i el vent bufés a 10 $m\ s^{-1}$, una velocitat del vent que és poc freqüent, però que s'ha donat en alguns casos (Figura 4.9).

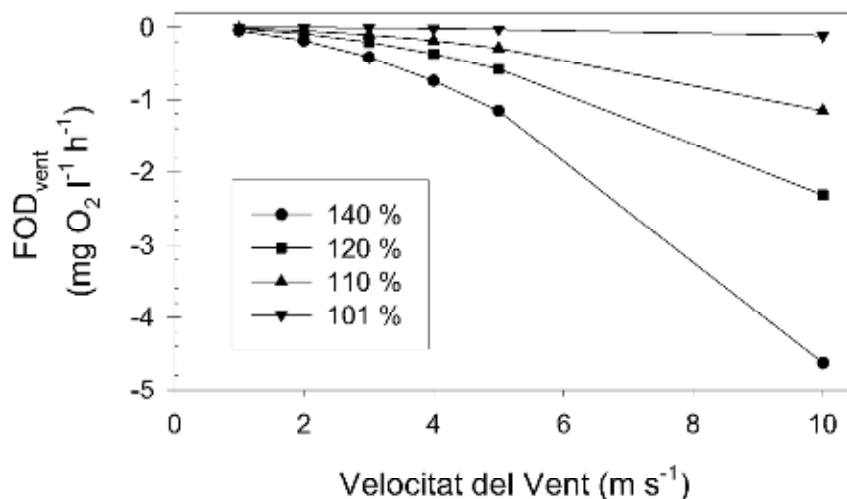


Figura 4.8. Flux d' O_2 de l'aigua a l'aire en funció de la velocitat del vent ($m\ s^{-1}$) i per varies sobresaturacions d'oxigen dissolt, considerant fixes salinitat a 35 psu i temperatura de l'aigua a 20 °C. Mètode de càlcul explicat al text. Valors negatius de FOD_{vent} indiquen sortida d'oxigen cap a l'atmosfera.

La moda de la distribució d'intensitat de vent al Delta de l'Ebre es situa en el rang de 1 a 1.5 $m\ s^{-1}$ de velocitat (Figura 4.9), per a tot l'any 1997 com a referència. Això provoca que ens haguem de centrar en la franja dels 1 a 3 $m\ s^{-1}$ del gràfic anterior (Figura 4.8), atès que durant tot l'any 1997 més del 50 % del temps el vent bufa entre aquestes intensitats, i les saturacions d'oxigen superficials es troben entre el 90 % i el 110 % la major part del temps (Figura 4.7d). És a dir, que el vent al llarg de tot 1997 estaria extraient entre 0.001 i 0.1 $mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$, en funció de si l'oxigen es troba un 1% de saturació per sobre de l'equilibri i els vents són suaus (valors mínims de flux de sortida) o de si l'oxigen es troba un 10% de saturació per sobre de l'equilibri i els vents són propers als 3 $m\ s^{-1}$. En el cas de les situacions de dèficit d'oxigen, els fluxos serien els equivalents a les mateixes quantitats de dèficit, però de signe contrari, segons la fórmula emprada (eq. <4.4>).

Consum d'oxigen i canvis en les concentracions de carboni.

El consum d'oxigen és explicat majoritàriament per consum de COP, i el COD sembla més refractari, menys a finals d'estiu, en que la matèria orgànica sembla ser més refractària (atès que el consum de COP no està relacionat significativament amb el consum d'oxigen de l'aigua). I es que la matèria orgànica present en ambients aeròbics, com és el cas general de la columna d'aigua de la badia dels Alfacs, sol consistir majoritàriament de compostos refractaris no aptes per l'assimilació dels consumidors (Degens i Mopper 1976).

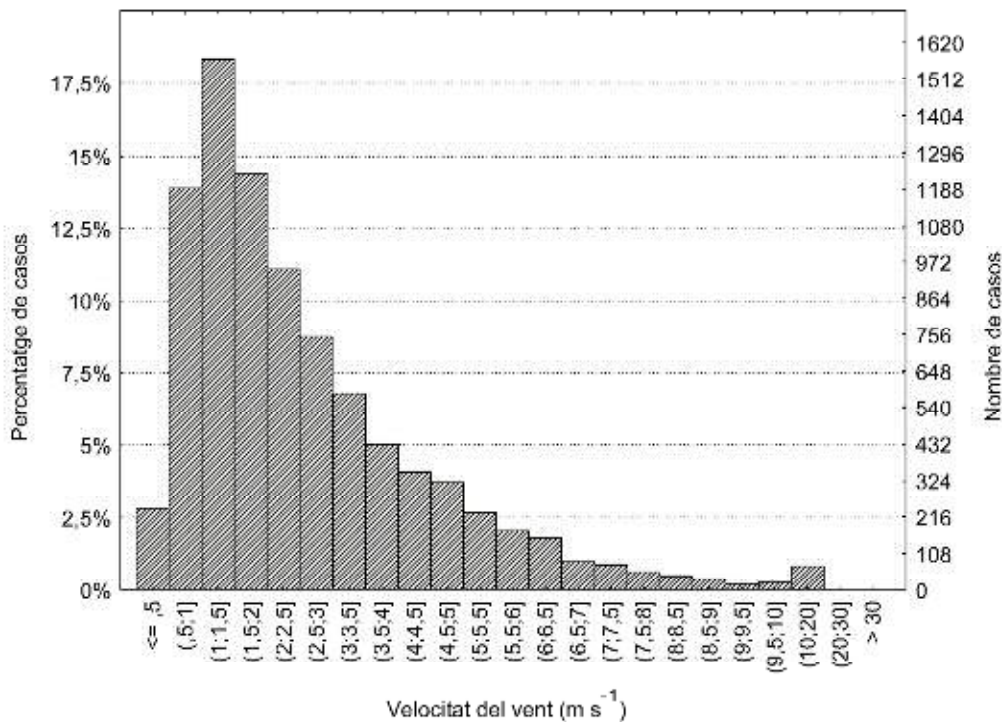


Figura 4.9. Distribució de la velocitat del vent al Delta de l'Ebre. 1997. Les dades són mitjanes horàries de l'estació meteorològica *Amposta-DARP*.

A més, la relació estequiomètrica molt inferior a la unitat entre els consums d'oxigen i carboni (0.44 mols O₂ respirats per mol C orgànic consumit el gener a 15 °C, i 0.48 a 23°C, i 0.02 a setembre a 15 °C, dades no mostrades) indica que aquesta matèria orgànica és poc consumida per respiració aeròbica a l'hivern, i molt menys a finals d'estiu (en el cas de compostos similars a la glucosa donaria una relació estequiomètrica d'O₂:C_{orgànic} d'1, i per compostos refractaris s'esperaria que aquest valor fos superior). Així, es va donar consum de carboni orgànic en absència d'oxigen (a causa de possibles microgradients), al menys, parcialment.

El cas de l'estació *Cua* presenta algunes singularitats: per un costat la comentada per al gener de 1997, i per l'altre, la de setembre de 1998, en que *Cua superficial* i *Cua fons* van ser els únics compartiments amb salinitats inferiors a 35.5 psu, i concentracions de COD *in situ* de més del doble que els altres compartiments (Taula 4.6). Aquests valors notablement aïllats de la resta en la Figura 4.2 serien fàcils d'explicar sota dues condicions: (1) si el COD procedís en aquest cas dels canals de desguàs dels arrossars i fos altament refractari, és generaria una demanda bioquímica d'oxigen molt inferior a l'esperable, o (2) el COD fos consumit per organismes anaeròbics, que tot i semblar difícil a la columna d'aigua, poden haver-hi microgradients en partícules detrítiques, l'interior de les quals pot ser proper a l'anòxia (J. Romero, *com. pers.*)

Fitoplàncton detrític

El material orgànic particulat de la badia sembla estar format en general per fitoplàncton, tal i com es dedueix de la correlació positiva entre el carboni orgànic particulat i la concentració de clorofil·la a (Figura 4.3a). Gran part d'aquest fitoplàncton estaria inactiu, com indica la correlació negativa entre l'oxigen dissolt i la concentració de Clorofil·la a (Figura 4.3f). Ara bé, aquesta visió basada en les mitges anuals no es reproduïx a cada estació climatològica. Durant l'estiu el 54% de la variància de les dades de COP és explicat per les concentracions de clorofil·la a. No obstant, no hi ha correlació entre la clorofil·la a i la concentració d'oxigen dissolt (Figura 4.3i), indicant o bé la presència de clorofil·la detrítica (per exemple, aportada pels canals de desguàs) o bé, entrades d'oxigen no degudes a producció de fitoplàncton.

Pel contrari, a l'hivern tota la clorofil·la a sembla estar activa, com ho indica la correlació positiva amb la concentració d'oxigen dissolt a l'hivern ($r^2=0.731$, $p<0.05$, Figura 4.3g), encara que en aquest moment hi ha força carboni que no és fitoplàncton, com ho indica l'absència de correlació significativa entre el COP mesurat i la clorofil·la a (Figura 4.3b). En les altres estacions climatològiques, la manca de correlació estadísticament significativa ens podria estar indicant que hi ha quantitat variable de COP no fitoplanctònic, a la vegada de que hi ha una proporció de clorofil·la a fotosintèticament no massa activa.

Així, els resultats d'aquest treball estarien indicant que si bé els valors de producció i productivitat de la clorofil·la a estimats en aquest treball són alts en el context de la literatura científica, força sovint el fitoplàncton de la badia dels Alfacs tindria una part important detrítica i per tant, fotosintèticament no massa activa.

Bibliografia

- Bender, M., *et al.*, 1987. A comparison of four methods for determining planktonic community production. *Limnol. Oceanogr.*, 32 (5): 1085-1098.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1997. "Interactions between physics and biology in the estuarine turbidity maximum (ETM) of Chesapeake Bay, USA (no citar sense consentiment de l'autor!!!)", a *International Council for the Exploration of the Sea*, 28. ICES, Copenhagen Denmark.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1996. A comparative analysis of eutrophication patterns in a temperate coastal lagoon. *Estuaries*, 19 (2B): 408-421.
- Caffrey, J. M., 2003. "Production, respiration and net ecosystem metabolism in U.S. estuaries", a *Coastal Monitoring Through Partnerships*, 207-219.
- Camp, J., *et al.*, 1991. Production-consumption budget in an estuarine bay: how anoxia is prevented in a forced system. *Oecologia aquatica*, 10 145-152.
- Cloern, J. E., 1979. "Phytoplankton ecology of the San Francisco Bay System: The status of our current understanding", a *San Francisco Bay: The urbanized estuary*, 247-264. Allen Press, Kansas.
- Cole, J. J., *et al.*, 1991. Phytoplankton primary production in the tidal, freshwater Hudson River, New York (USA). *Verh. Int. Verein. Limnol.*, 24 1715-1719.
- Cole, J. J., *et al.*, 1992. Can phytoplankton maintain a positive carbon balance in a turbid, freshwater, tidal estuary? *Limnol. Oceanogr.*, 37 1608-1617.
- Collos, Y., *et al.*, 1993. Chemical, isotopic and enzymatic monitoring of free and enclosed seawater: Implications for primary production estimates in incubation bottles. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 93 49-54.
- Côté, B. i Platt, T., 1983. Day-to-day variations in the spring-summer photosynthetic parameters of coastal marine phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 28 (2): 320-344.
- D'Avanzo, C., *et al.*, 1996. Ecosystem Production and Respiration in response to Eutrophication in Shallow Temperate Estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 141 263-274.
- Degens, E. i Mopper, K., 1976. "Factors controlling the distribution and early diagenesis of organic material i marine sediments", a *Chemical Oceanography*, 6, 59-113. Ed. Academic,

- Delgado, M., 1986. Ecología de diatomeas costeras. Relación Pláncton-Bentos. Doctoral, 261 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Durbin, E. G., *et al.*, 1975. Seasonal studies on the relative importance of different size fractions of phytoplankton in Narragansett Bay (USA). *Marine Biology*, 32 271-287.
- Falck, E., 1999. On the behaviour of oxygen in the euphotic zone of the Nordic Seas and on carbon and nutrients in the Northeast Water Polynya mixed layer. Dr. Scient Thesis, pp., *Department of Geophysics*, University of Bergen.
- Falck, E. i Gade, H. G., 1999. Net community production and oxygen fluxes in the Nordic Seas based on O₂ budget calculations. *Global Biogeochem. Cycles*, 13 1117-1126.
- Falkowski, P. G., 1980. "Light-shade adaptation in marine phytoplankton", a *Primary Productivity in the Sea*, 99-119. Plenum Press, New York.
- Geel, C., 1997. Photosystem II electron flow as a measure for phytoplankton Gross Primary Production. Ph. D. Thesis, 109 pp., *Department of Plant Physiology*, Wageningen Agricultural University.
- Grande, K. D., *et al.*, 1991. A comparison of net and gross rates of oxygen production as a function of light intensity in some natural plankton populations and in a *Synechococcus* culture. *Journal of Plankton Research*, 13 (1): 1-16.
- Hagy, J. D., *et al.*, 2000. Estimation of Net Physical Transport and Hydraulic Residence Times for a Coastal Plain Estuary Using Box Models. *Estuaries*, 23 (3): 328-340.
- Hamilton, D. i Herzfeld, M., 2001. Computational Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM). An ecological water quality model designed for coupling with hydrodynamic drivers:
- Harding, L. W., *et al.*, 1987. Adaptative responses of photosynthesis in phytoplankton: specificity to time-scale of change in light. *Biol. Oceanogr.*, 4 403-437.
- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1985. Photosynthesis patterns in Chesapeake Bay phytoplankton: Short and long-term responses of P-I curve parameters to light. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 26 (1-2): 99-111.
- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1982a. Diel oscillations of the photosynthesis-irradiance (P-I) relationship in natural assemblages of phytoplankton. *Mar. Biol.*, 67 (2): 167-178.

- Harding, L. W., Jr., *et al.*, 1982b. Primary production as influenced by diel periodicity of phytoplankton photosynthesis. *Mar. Biol.*, 67 (2): 179-186.
- Harding, L. W. J., *et al.*, 1986. Phytoplankton production in two east coast estuaries: photosynthesis-light functions and patterns of carbon assimilation in Chesapeake and Delaware Bays. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 23 773-806.
- Harrison, W. G. i Platt, T., 1980. Variations in assimilation number of coastal marine phytoplankton: effects of environmental co-variables. *Journal of Plankton Research*, 2 249-260.
- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Howarth, R. W., *et al.*, 1996. Metabolism and organic carbon fluxes in the tidal, freshwater Hudson River. *Estuaries*, 19 (4): 848-865.
- Inoue, H., 1974. Environmental structure of dissolved oxygen in the cultured regions of yellowtail. *Environ. Eng. in the Agriculture and Fisheries Field*, 289-336 (in Japanese).
- Jähne, B., 2001. "Air-Sea Gas Exchange", a *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 1, 122-131. Academic Press, San Diego, USA.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Jørgensen, B. B. i Sørensen, J., 1985. Seasonal cycles of O₂, NO₃⁻ and SO₄²⁻ reduction in estuarine sediments: The significance of an NO₃⁻ reduction maximum in spring. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 24 65-74.
- Kemp, W. M. i Boynton, W. R., 1980. Influence of Biological and Physical Processes on dissolved oxygen dynamics in an Estuarine System: Implications for Measurement of Community Metabolism. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2 407-431.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1992. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake bay: Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 85 (1-2): 137-152.
- Kester, D. R., *et al.*, 1996. Modeling, measurements, and satellite remote sensing of biologically active constituents in coastal waters. *Marine Chemistry*, 53 131-145.

- Kromkamp, J. i Peene, J., 1995. Possibility of net phytoplankton primary production in the turbid Schelde Estuary (SW Netherlands). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 121 249-259.
- Lalli, C. M. i Parsons, T. R., 1993. Biological oceanography: an introduction:
- Lee, J. H. W., *et al.*, 1991. Dissolved oxygen variations in marine fish culture zone. *Journal of Environmental Engineering*, 117 (6): 799-815.
- Lewitus, A. J. i Kana, T. M., 1995. Light respiration in six estuarine phytoplankton species: contrast under photoautotrophic and mixotrophic growth conditions. *J. Phycol.*, 31 754-761.
- Liss, P. i Merlivat, L., 1986. "Air-sea gas exchange rates: introduction and synthesis", a *The Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling*, 113-127. D Reidel, Dordrecht, Utrecht.
- Macedo, M. F., *et al.*, 1998. Dynamic behaviour of photosynthesis-irradiance curves determined from oxygen production during variable incubation periods. *Marine Ecology Progress Series*, 165 31-43.
- Marino, R. i Howarth, R. W., 1993. Atmospheric oxygen exchange in the Hudson River: Dome measurements and comparison with other natural waters. *Estuaries*, 16 (3 PART A): 433-445.
- Munekage, Y., 1992. Application of a two-layer box model to dissolved oxygen budget in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 35 (1): 129-145.
- Nixon, S. W., 1986. "Nutrient dynamics and the productivity of marine coastal waters", a *Marine Environment and Pollution*, 97-115. The Alden Press, Oxford.
- Nixon, S. W., *et al.*, 1986. Nutrients and the productivity of estuaries and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. S. Afr.*, 12 (1/2): 43-71.
- Norro, A. i Frankignoulle, M., 1996. Biogeochemical box modelling at small scale application to the inorganic carbon cycle in the Bay of Calvi. *Ecological Modelling*, 88 101-112.
- Odum, H. T., 1956. Primary production in flowing waters. *Limnol. Oceanogr.*, 1 102-117.
- Officer, C. B., 1980. "Box model revisited", a *Estuarine and wetland processes: with emphasis on modelling*, 65-114. Plenum Press, New York.
- Olesen, M., *et al.*, 1999. Influence of nutrients and mixing on the primary production and community respiration in the Gulf of Riga. *Journal of Marine Systems*, 23 (1-3): 127-143.

- Parsons, T. R., 1963. Suspended organic matter in seawater. *Progress in Oceanography*, 1 205-239.
- Pastres, R., *et al.*, 1997. Local sensitivity analysis of a distributed parameters water quality model. *Reliability Engineering and System Safety*, 57 21-30.
- Petersen, J. E., *et al.*, 1998. Coastal plankton responses to turbulent mixing in experimental ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 171 23-41.
- Peterson, B. J., 1980. Aquatic primary productivity and the ^{14}C - CO_2 method: a history of the productivity problem. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 11 359-385.
- Pingree, R. D., *et al.*, 1975. Summer phytoplankton blooms and red tides along tidal fronts in the approaches to the English Channel. *Nature*, 258 (5537): 672-677.
- Prézelin, B. B., 1981. "Light reactions in photosynthesis", a *Physiological Bases of Phytoplankton Ecology*, 210, 1-43. *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.*,
- Riegman, R. i Colijn, F., 1991. Evaluation of measurements and calculation of primary production in the Dogger Bank area (North Sea) in summer 1988. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 69 125-132.
- Savidge, G., 1988. Influence of inter- and intra-daily light-field variability on photosynthesis by coastal phytoplankton. *Mar. Biol.*, 100 127-133.
- Skjelvan, I., *et al.*, 2001. Oxygen fluxes in the Norwegian Atlantic Current. *Marine Chemistry*, 73 (3-4): 291-303.
- Slawyk, G., *et al.*, 1984. Comparison of radioactive and stable isotope tracer techniques for measuring photosynthesis: ^{13}C and ^{14}C uptake by marine phytoplankton. *J. Plankton Res.*, 6 249-257.
- Steeman-Nielsen, E., 1952. The use of radioactive carbon (^{14}C) for measuring organic production in the sea. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer.*, 18 117-140.
- Stigebrandt, A., 1991. Computations of oxygen fluxes through the sea surface and the net production of organic matter with application to the Baltic and adjacent seas. *Limnol. Oceanogr.*, 36 (3): 444-454.
- Svendsen, H., 1997. Physical oceanography and marine ecosystems: Some illustrative examples. *Sci. Mar. Barc.*, 61 (suppl. 1): 93-108.

- Swaney, D. P., *et al.*, 1999. A novel approach for estimating ecosystem production and respiration in estuaries: Application to the oligohaline and mesohaline Hudson River. *Limnol. Oceanogr.*, 44 (6): 1509-1521.
- Tans, P. P., *et al.*, 1990. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget. *Science*, 247 1431-1438.
- Thomann, R. V. i Mueller, J. A., 1987. "Dissolved oxygen", a *Principles of surface water quality modelling and control*, 261-384. Harper & Row, New York.
- UNESCO, 1973. International oceanographic tables, 2:
- Valiela, I., 1995. Marine Ecological Processes:
- Wanninkhof, R., 1992. Relationship between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 97 (C5): 7373-7382.
- Welch, H. C., 1968. Use of modified diurnal curves for the measurement of metabolism in standing water. *Limnol. Oceanogr.*, 13 679-687.
- Witek, Z., *et al.*, 1999. Primary production and decomposition of organic matter in the epipelagic zone of the Gulf of Gdansk, an estuary of the Vistula. *Ices Journal of Marine Science*, 56 3-14.
- Wolf, D. K. i Thorpe, S. A., 1991. Bubbles and the air-sea exchange of gases in near-saturation conditions. *J. Mar. Res.*, 49 435-466.
- Yentsch, C. S., 1980. "Light attenuation and phytoplankton photosynthesis", a *The Physiological Ecology of Phytoplankton*, 95-125. University of California, Berkeley.
- Yentsch, C. S. i Menzel, D. W., 1963. A method for the determination of phytoplankton chlorophyll and phaeophytin by fluorescence. *Deep-Sea Research*, 10 221-231.

**Capítol 5. El paper del bentos i dels seus
macròfits**

Capítol 5 . El paper del bentos i dels seus macròfits

Introducció general

Els macròfits bentònics són peces clau en els fluxos de matèria i energia de les aigües costaneres, on són responsables, per terme mig, de prop del 40% de la producció primària (Charpy-Robaud i Sournia 1990). Les comunitats de macròfits poden assolir valors molt alts de producció i/o de biomassa (Valiela 1995), i per tant la seva presència afecta de manera decisiva els cicles de nutrients, les xarxes tròfiques i els balanços d'oxigen, entre d'altres aspectes importants de la dinàmica ecològica i biogeoquímica del sistema.

Podem considerar, al menys en termes organitzatius de l'aparell vegetatiu, dos grans grups de macròfits marins: les algues¹¹ i les fanerògames marines. Tradicionalment, es considera que les primeres són pròpies de substrats rocosos, mentre que les segones colonitzen substrats sedimentaris. Aquesta distinció no és, però, més que indicativa, doncs hi ha tant espècies de fanerògames marines que poden viure sobre roca com algues capaces de colonitzar sediments, bé per posseir estructures de fixació adients (el cas del gènere *Caulerpa*, per exemple), bé per ser capaces de fixar-se a petits còdols o closques, o bé per poder viure simplement "dipositades" sobre el fons sense fixació especial, com és el cas d'alguns cloròfits (*Ulva*) o d'algues d'altres grups, sobre tot a indrets no gaire exposats a l'hidrodinamisme.

Als sistemes estuaris hi dominen clarament els fons sedimentaris, i són per tant les fanerògames marines i algues com les descrites els macròfits dominants, quan n'hi ha. La presència o no de macròfits sembla estar controlada per factors relativament senzills, com ara la profunditat i la llum, modulada aquesta per l'abundància de plàncton, i per tant depenent del grau d'eutròfia (Duarte 1995). A la vegada, i en cas d'haver vegetació bentònica, la naturalesa d'aquesta pot resultar important pel conjunt del sistema, segons les seves propietats, per exemple de taxa de renovació (P/B), molt relacionada amb altres característiques ecològicament rellevants (Cebrian i Duarte 1995). Així, les fanerògames, amb òrgans perdurants, baixes taxes de renovació i fulles més o menys riques en substàncies refractàries, representarien una situació extrema; i a l'altre extrem tindriem les algues de creixement més ràpid i oportunistes, amb temps de generació curts i amb teixits relativament més rics (índex C/N més baix), com ara *Ulva*. En qualsevol cas, sembla evident que els macròfits bentònics

¹¹ Les classificacions més recents dels grups d'éssers vius (posteriors a la classificació en 5 Regnes de Whittaker 1969) inclouen les algues en diferents regnes entre els 8 del domini d'organismes eucariotes, segons si són vermelles o verdes (Regne *Plantae*, al qual pertanyen també les fanerògames), o si són brunes (Regne *Heterokonta*). De totes formes, aquesta nova classificació no afecta massa les apreciacions fetes en el marc d'aquesta tesi doctoral, doncs les algues vermelles i verdes estudiades, tot i poder pertanyer al mateix Regne d'organismes que les fanerògames marines (segons la classificació emprada), mostren particularitats histològiques i ecològiques pròpies que justifiquen considerar-les aquí encara com a grup a part de les fanerògames marines. I, ademés, com bé s'ha dit anteriorment, "potser les algues no existeixen, però sens dubte... n'hi ha" (Romero 2004).

són actors prou importants com per dedicar-hi una part de la tesi esbrinant, tant d'una banda, la extensió i composició de les seves comunitats, com d'altra, les seves característiques productives.

En el cas de la badia dels Alfacs, la situació és una mica peculiar a aquest respecte. Efectivament, treballs fets sobre tot durant els anys vuitanta havien permès un coneixement bastant precís de la seva vegetació bentònica. Així, Pérez i Camp (1986) havien cartografiat les plataformes someres, a on es trobaven sobre tot praderies més o menys extenses de la fanerògama *Cymodocea nodosa*, barrejada en alguns punts amb l'alga *Caulerpa prolifera*. D'altra banda, Martínez (1990) havia quantificat les acumulacions de macroalgues (*Ulva*, rodòfits, algun feòfit) a les plataformes, especialment a la plataforma nord; aquesta autora esmentava també la presència de macroalgues a zones més fondes de la cubeta, però molt localitzades a la seva banda nord. La resta de la cubeta central, estudiada per aquests autors i visitada repetidament durant els anys vuitanta (per exemple: Camp *et al.* 1991; Vidal 1994, Vidal *et al.* 1997, Vidal *et al.* 1989) no tenia cap mena de vegetació macroscòpica. Ara bé, quan es van començar les preses de mostres per la present tesi, al 1996, i tal com ja s'ha comentat en altres apartats, es va detectar una cobertura quasi contínua de la cubeta central per macroalgues. L'aparició d'aquests nous actors era, sens dubte, un fet prou important en el marc dels nostres objectius com per invertir un mínim esforç per conèixer-los. Per tant, es van plantejar els objectius següents:

- 1) documentar i descriure la "nova" vegetació de la cubeta, tot identificant les espècies principals i avaluant la seva abundància i distribució;
- 2) estimar la contribució de la vegetació bentònica (de fet, del bentos en general) de la cubeta als balanços d'oxigen de la badia dels Alfacs.

Cada un dels dos objectius es tracta en cada un dels dos grans apartats d'aquest capítol.

Subcapítol 5.A. Canvis en la vegetació submergida de la badia dels Alfacs en la dècada dels 90

Subcapítol 5.A. Canvis en la vegetació submergida de la badia dels Alfacs en la dècada dels 90

5.1. Introducció

Els macròfits aquàtics són en general molt sensibles a canvis ambientals (Kemp *et al.* 1983) fet que sovint ha provocat canvis temporals o espacials en composició d'espècies i abundància. Els exemples que es poden trobar a la literatura inclouen, entre molts altres, una colonització ràpida de fanerògames marines després d'una regressió sobtada (llac Grevelingen; Nienhuis 1984), la substitució en dominància d'espècies de fanerògames marines després d'una reducció de salinitat en una llacuna costanera hipersalina (Laguna Madre; Quammen i Onuf 1993), l'extensió de l'alga *Caulerpa prolifera* (Forsskål) Lamouroux en una llacuna costanera mediterrània hipersalina (Mar Menor, Pérez-Ruzafa *et al.* 1989) i canvis en la composició d'espècies macroalgals i la cobertura de fanerògames marines en una llacuna costanera mediterrània eutròfica (Llacuna de Venècia, Sfriso i Marcomini 1996). Un canvi apareix esmentat amb certa freqüència: la substitució de fanerògames marines de creixement lent per macroalgues de creixement ràpid o formadores de "blooms", substitució que ha estat atribuïda generalment a l'eutrofització (Sand-Jensen i Borum 1991, Duarte 1995), encara que les interaccions entre nutrients, característiques hidrodinàmiques (per exemple, temps de residència) i els processos biològics (per exemple, herbivoria) són en general complexes (Valiela *et al.* 1997). En qualsevol cas, els controls sobre la distribució, la composició específica i l'abundància de la vegetació bentònica són lluny de ser dilucidats plenament.

Independentment de la causa que els origini, els canvis de la vegetació bentònica poden tenir conseqüències importants per a l'ecosistema. Així, el desenvolupament algal massiu canvia profundament els cicles dels elements, interceptant, per exemple, els nutrients alliberats pel sediment i emmagatzemant-los en forma de biomassa (Astill i Lavery 2001, Valiela *et al.* 1997). A més, els "blooms" algals, encara que poden proporcionar menjar per una gamma de consumidors, també augmenten fortament la demanda d'oxigen (per exemple, de nit o a l'època de l'any en que la respiració i la degradació excedeixen la producció) i finalment poden provocar esdeveniments hipòxics o anòxics, amb l'eventual mortalitat massiva d'animals, entre d'altres efectes (Diaz i Rosenberg 1995). La descripció dels canvis en la vegetació bentònica, i de les conseqüències que provoquen, ha generat una vasta literatura pel seu ampli interès tant bàsic com aplicat (veure revisions de Schramm i Nienhuis 1996, Morand i Briand 1996). Per últim, algunes macroalgues són portadores de substàncies tòxiques per a altres organismes, inclosos els humans, i afegeixen altres efectes potencials sobre l'ecosistema (Impellizzeri *et al.* 1975, Iverson i Truelove 1994, Sato *et al.* 1996, Higa i Kuniyoshi 2000).

Disposar d'una bona caracterització de la vegetació bentònica, de la seva abundància i de la seva distribució és sens dubte indispensable per estimar els seus efectes sobre l'ecosistema. Així doncs, en aquest subcapítol es pretén descriure la "nova" vegetació apareguda a la part més fonda de la

Badia dels Alfacs, en termes de distribució espacial de la biomassa i els seus canvis estacionals, tot analitzant les possibles causes d'aquesta colonització. Per la naturalesa de les espècies trobades, es fa un cert èmfasi en la seva possible toxicitat.

5.1. Metodologia

Presa i processament de mostres

Es van analitzar la cobertura i biomassa de la vegetació bentònica de la badia dels Alfacs. Es presenten aquí els resultats per la part central i més profunda (l'anomenada "cubeta central") per la seva major incidència en el balanç d'oxigen de la badia, mentre que els de les plataformes estan exposats en un altre treball (Pérez *et al.* in prep).

Per estimar la cobertura es van visitar 23 punts durant la primavera de 1997 (Figura 5.1), posicionats per GPS, uniformement distribuïts sobre la cubeta i inspeccionats amb l'ajut d'escafandre autònom. A la tardor de 1997 i l'hivern de 1998 es van visitar 8 llocs nous. A cada un d'aquests punts, es van anotar les espècies dominants i la seva cobertura, entesa com a percentatge de sediment ocupat per macròfits i estimada visualment sobre un àrea de 10 m².

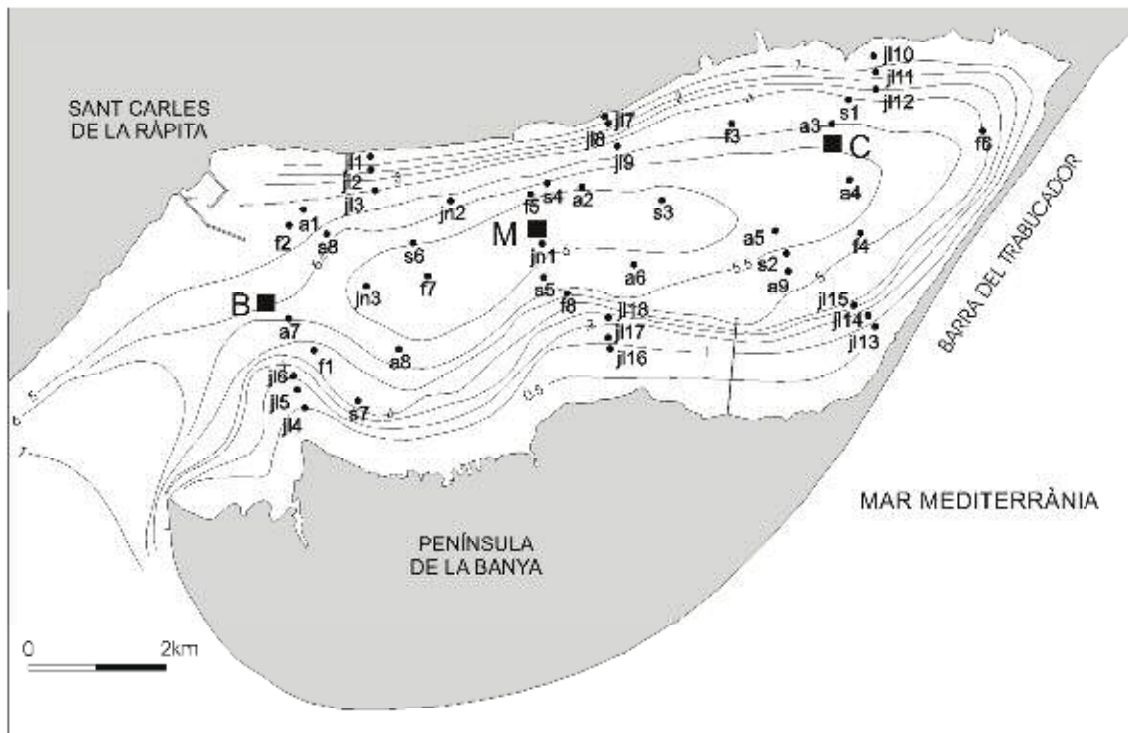


Figura 5.1. Punts de mostreig del mapa de distribució de macroalgues bentòniques. Els cercles corresponen al mostreig espacial i les lletres dels codis fan referència a la data de mostreig (a=14/04/97, jn=9/06/97, jl=9/07/97, s=25/09/97, f=17/feb/98). Els quadrats indiquen els llocs de mostreig de la dinàmica temporal (B=Boca, M=Mig, C=Cua).

Per conèixer els canvis estacionals de biomassa algal es van mostrejar les estacions habituals de *Boca*, *Mig* i *Cua*. A cada una d'elles es van agafar 6 rèpliques en 7 moments diferents entre 1997 i 1998 (març, abril, juny, juliol i octubre de 1997, i febrer i juliol de 1998). Cada mostra va ser agafada amb l'ajut d'un cilindre metàl·lic de 500 cm² de superfície interna (Figura 5.2), tot recollint totes les algues presents al seu interior. Les mostres es van guardar en fred per transportar-les al laboratori, on

van ser congelades fins el seu processament. Posteriorment es van separar les principals espècies trobades i es va obtenir el seu pes sec després de 24h a 75 °C. El resultat va ser finalment expressat en g PS m⁻².



Figura 5.2. Cilindre mostrejador de biomassa macroalgal (àrea interna 500 cm²).

Per descriure la distribució espacial de la biomassa de les macroalgues dominants a la badia es van prendre mostres de biomassa addicionals a les dels punts per al seguiment estacional, a fi i efecte d'ampliar mínimament l'abast espacial del mostreig fins sobrepassar la desena de punts de mostreig georeferenciats amb les seves coordenades UTM.

Tractament de les dades

Per tenir una visió sintètica de la distribució de biomassa algal a la badia, es van representar gràficament els valors el mes d'Abril. Per tal de completar aquestes dades, es van utilitzar també resultats d'altres punts mostrejats en altres mesos (veure més amunt). Per fer les dades comparables, es va estimar la biomassa d'abril mitjançant ajusts analítics de les dades estacionals de les tres estacions bàsiques (veure resultats). Això pot introduir un cert biaix, però és l'única manera d'obtenir una cartografia de la biomassa raonable. D'altra banda, aquesta cartografia no s'utilitza ni a la resta del capítol ni als balanços que es presenten al capítol següent.

Les biomasses obtingudes a les mostres ("biomassa puntual") van ser corregides per la cobertura, per tal d'obtenir una estimació més acurada de la biomassa real ("biomassa global"), emprant-se la següent fórmula per a la conversió:

$$Biomassa\ global = \frac{biomassa\ puntual * cobertura}{100} \quad <5.1>$$

5.1. Resultats

Els poblaments de macroalgues de la part central de la Badia dels Alfacs estan bàsicament dominats per dues espècies: *Caulerpa prolifera* (Forsskål) J.V.Lamouroux, cloròfit laminar amb rizoides i *Alsidium corallinum* C.Agardh, rodòfit filiforme de l'ordre de les Ceramials (Figura 5.3). Una tercera espècie, *Gracilaria verrucosa* (Hudson) Papenfuss, pot ser també abundant de forma ocasional, trobant-se barrejada amb l'anterior en alguns punts; es tracta també d'un rodòfit ramificat, aquest de l'ordre de les Gigartinals. Aquestes dues rodofícies, encara que de morfologia força semblant, es diferencien amb relativa facilitat; en efecte, la primera (*A. corallinum*) presenta una cèl·lula central observable en tall transversal, així com, eventualment, bandes anellades als àpexs joves, mentre que la segona (*G. verrucosa*) no presenta cap d'aquestes dues característiques. Esporàdicament es va trobar *Ulva* sp. i *Rytiphloea tinctoria* (Clemente y Rubio) C. Agardh, en quantitats modestes.

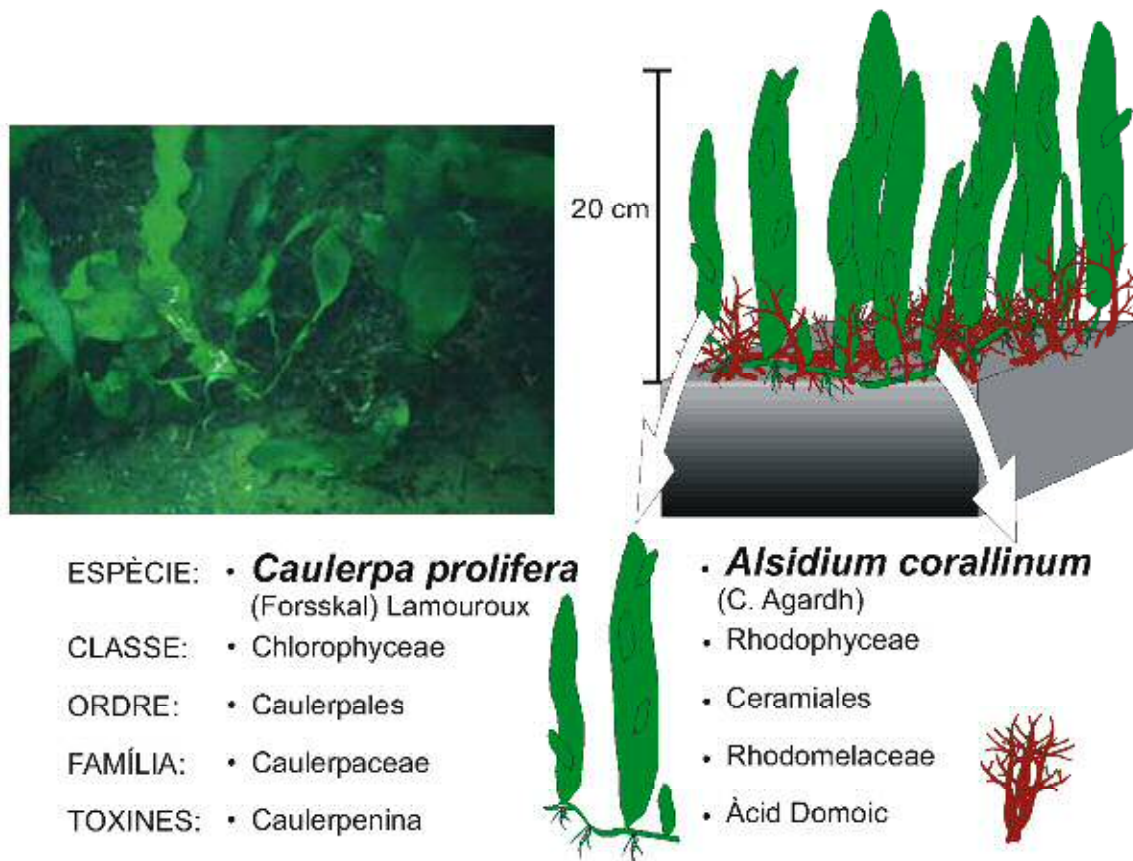


Figura 5.3. Foto i característiques de les dues espècies de macroalgues bentòniques que han colonitzat recentment la badia dels Alfacs.

Distribució

Les macroalgues recobreixen la major part de la cubeta, fet que contrasta amb la baixa cobertura existent al 1987 (Figura 5.4a, b, per 1987 i 1997 respectivament). Només trobem dues grans àrees amb cobertura inferior al 100%. La primera és just a l'entrada de la badia, amb cobertures d'entre el

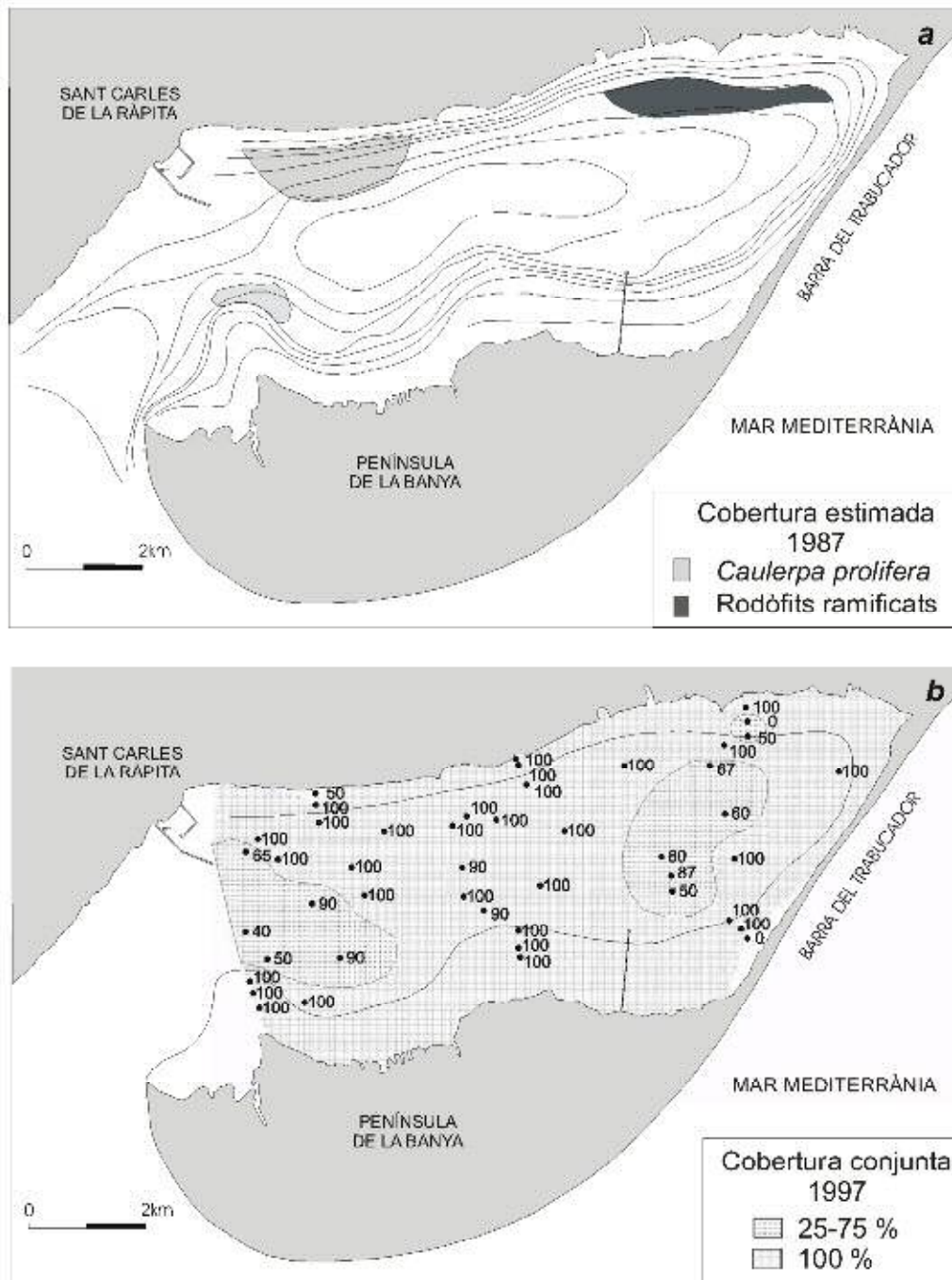


Figura 5.4. Distribució i cobertura de les macroalgues a la badia dels Alfac: (a) possible extensió i distribució de la cobertura de les macroalgues bentòniques en 1987 a la cubeta central, a partir d'observacions puntuals durant l'anterior projecte de recerca a la badia dels Alfac (J. Romero, *com, pers.*), (b) cobertura bentònica conjunta de les dues espècies de macroalgues *Caulerpa prolifera* i *Alsidium corallinum* en 1997.

40 i el 90%, essent *Caulerpa prolifera* l'espècie dominant. La segona zona és a la part més interior de la cubeta, on predomina *Alsidium corallinum*, que assoleix cobertures entre 50 i 90%.

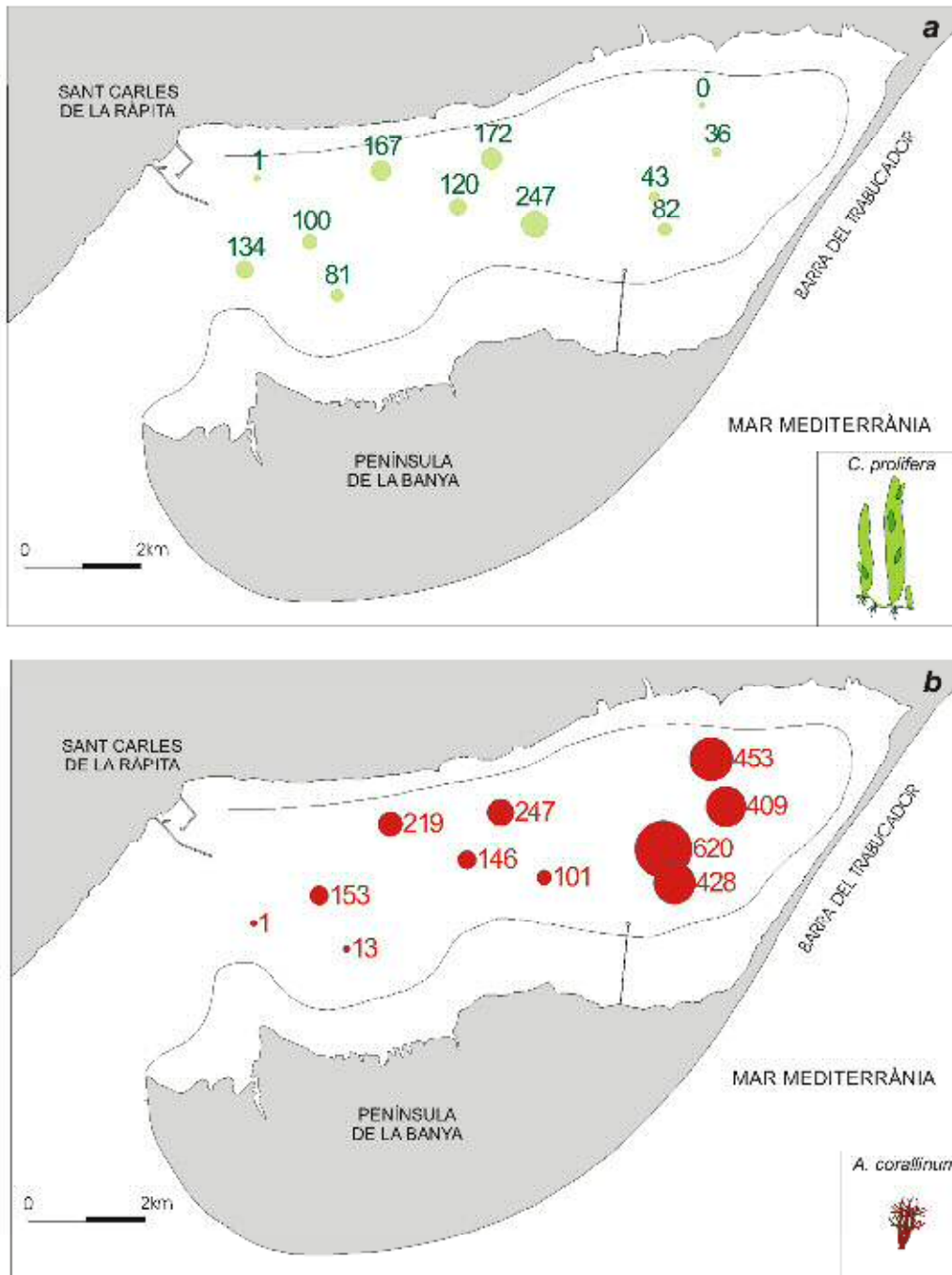


Figura 5.5. Biomassa de macroalgues (g PS m⁻²) a l'Abril de 1997: (a) cloròfit laminar *Caulerpa prolifera*, (b) rodòfits ramificats, fonamentalment *Alsidium corallinum*.

Pel que fa a la biomassa, ajustada a la biomassa d'abril (Taula 5.1) i expressada com a biomassa "global" (equació <5.1>), les dues macroalgues presenten distribucions de biomassa pràcticament complementàries (Figura 5.5). L'extrem oest està dominat en exclusiva per poblacions de *Caulerpa prolifera* amb valors al voltant dels 100 g PS m⁻², mentre que l'extrem est està dominat fonamentalment per *Alsidium corallinum* amb valors d'entre 400 i 620 g PS m⁻², eventualment amb alguns filaments de *Gracilaria verrucosa*. En aquesta zona est, *C. prolifera* presenta unes biomasses d'entre 30 i 80 g PS m⁻², mentre que les d'*A. corallinum* a la zona oest són entre 0 i 200 g PS m⁻². Als

voltants de l'estació *Mig*, totes dues espècies coexisteixen amb biomasses d'entre 100 i 250 g PS m⁻² cadascuna.

Taula 5.1. Coeficients dels polinomis de 3r ordre que descriuen la dinàmica temporal de biomassa de les dues espècies de macroalgues, per compartiments. La funció general és $B(T) = B_{m\grave{a}x} (B_0 + aT + bT^2 + cT^3)$.

	Boca	Mig		Cua
	C/C _{màx}	C/C _{màx}	RR/RR _{màx}	RR/RR _{màx}
B _{màx}	128	181	272	700
B ₀	-0,5757	0,0264	0,5930	0,1890
a	0,0115	8,77e-3	-2,5921	5,38e-3
b	-4,26e-5	-4,03e-5	5,5347	-2,73e-5
c	4,31e-8	4,52e-8	-3,0830	3,53e-8
R ²	0,510	0,613	0,291	0,520

C correspon a *Caulerpa prolifera*. RR correspon a Rodòfits ramificats, fonamentalment *Alsidium corallinum*.

Evolució temporal de Biomassa

La biomassa de les macroalgues mostra una evolució estacional característica, amb màxims primaverals de prop de 200 g PS m⁻² de *C. prolifera* a l'estació *Mig* i prop de 600 g PS m⁻² per *A. corallinum* a l'estació *Cua*, i mínims de tardor-hivern del cloròfit de prop d'una desena de g PS m⁻² a l'estació *Boca* i de 60 g PS m⁻² del rodòfit a l'estació *Mig* (Figura 5.6a i b).

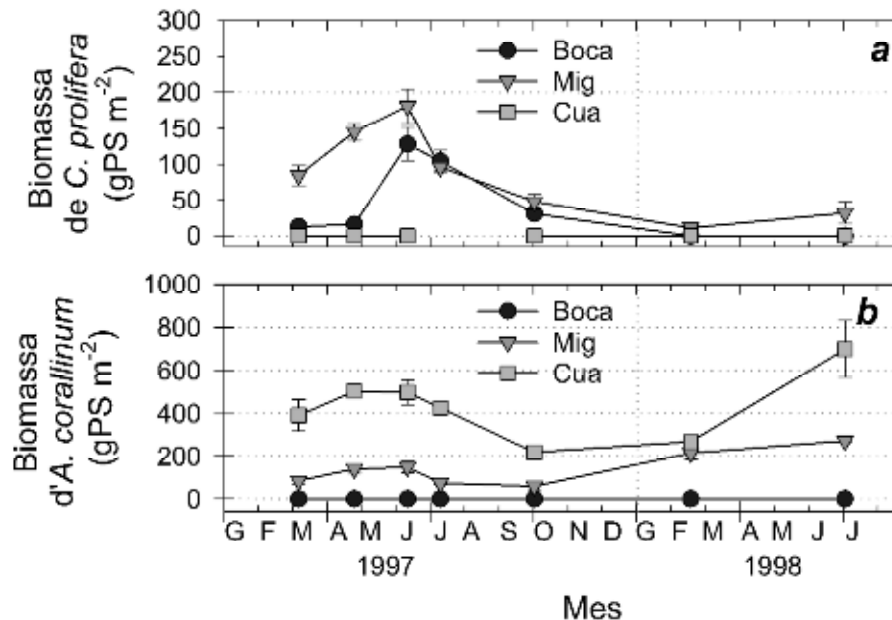


Figura 5.6. Evolució temporal de la biomassa de macroalgues en cadascuna de les estacions de mostreig de la dinàmica temporal (veure Figura 5.1): (a) *Caulerpa prolifera*, (b) Rodòfits ramificats, fonamentalment *Alsidium corallinum*, i ocasionalment amb escassa contribució d'acúmul barrejats de *Gracilaria verrucosa*.

5.1. Discussió

Biomasses

Les biomasses assolides a la badia dels Alfacs són dins el rang natural descrit en altres indrets, però amb una distribució temporal diferent. Per exemple, les poblacions de *C. prolifera* del Mar Menor presenten valors màxims de prop de 170 g PS m⁻² a l'estiu, valors mantinguts a la tardor, i valors mínims entre 0 i 57 g PS m⁻² durant finals d'hivern i inici de primavera (Terrados i Ros 1995). Altres poblacions, com la de la badia d'Algesires, presenten màxims de l'ordre dels 200 g PS m⁻² a setembre i mínims entre les poques unitats de gram i uns 90 g PS m⁻² al maig (Sánchez-Moyano *et al.* 2001). La població dels Alfacs presenta el seu màxim al voltant dels 200 g PS m⁻², similar a les altres poblacions descrites a la literatura, però el seu pic de biomassa apareix precisament a finals de primavera, de tal manera que a l'inici de la tardor es troben més a prop dels mínims anuals per sota dels 50 g PS m⁻² que a prop dels màxims. Es podria atribuir aquesta diferent distribució del pic estacional de màxima biomassa al fet que la llum disminueixi en el fons de la columna d'aigua a partir de maig-juny (Figura 2.4 i Figura 2.5) i, alhora, la demanda respiratòria pugi, lligada a les majors temperatures de l'aigua en aquests mesos (Figura 2.8b i Figura 2.12b). El balanç de carboni se'n veuria ressentit, fent disminuir l'abundància (biomassa i cobertura).

Estratègies ecològiques i associacions d'espècies

Tradicionalment s'ha cregut que *Caulerpa prolifera* podria actuar com una espècie pionera en la successió ecològica que porta al desenvolupament d'una comunitat de fanerògames marines, tal i com s'ha citat a altres espècies del mateix gènere (Williams 1981). Aquest podria ser el cas de les plataformes someres de la badia dels Alfacs, on es troben poblacions barrejades de *Caulerpa prolifera* i la fanerògama *Cymodocea nodosa*, relativament estables ambdues, de totes formes, fins a la data (Mascaró *et al.* 2006), tot i que a fondàries superiors (> 3 m), només hi sol habitar *C. prolifera*, probablement per que no hi ha prou llum per a que la fanerògama pugui sobreviure (Pérez *et al.* in press).

Els rodòfits ramificats bentònics, per la seva banda, són colonitzadors habituals dels fons somers estuaris. Algunes de les espècies més freqüents en aquests ambients pertanyen al gènere *Gracilaria*, com *G. comosa*, a Austràlia Occidental, *G. tickvahiae* a la costa est del continent nord-americà o *Gracilaria verrucosa* al Mediterrani, a Namíbia, Sudàfrica i Florida (Morand i Briand 1996).

L'associació de *Caulerpa prolifera* amb poblacions de rodòfits ramificats no és nova i ja ha estat citada per exemple a les illes Canàries amb espècies del gènere *Gracilaria* i *Spyridia* (Børgesen 1925). Com ja s'ha dit, als Alfacs també s'hi troben de forma freqüent filaments de *Gracilaria verrucosa* entre la comunitat d'*Alsidium corallinum*, encara que no gaire abundants; és possible que la major palatabilitat de la primera respecte la segona influeixi en la seva menor abundància.

La coexistència de dos tipus de productors primaris, uns de tipus laminar amb capacitat d'agafar substàncies del sediment (per la presència d'arrels o rizoides), i uns altres de filiformes és prou freqüent i permet una certa distribució dels recursos potencialment més limitants del mateix hàbitat (fonamentalment llum i nutrients). Els productors laminars primis i els finament ramificats semblen ser els més eficients fotosintèticament, a partir de la *hipòtesi de forma-funcional* (Littler i Littler 1980, Littler 1980, Littler i Arnold 1982). A més, els primers poden agafar llum per sobre dels segons gràcies a mantenir els fronds o fulles erectes, mentre que aquests últims són molt atapeïts per sota, amb el que aconsegueixen filtrar el màxim de llum que arriba fins el sediment. Respecte els nutrients, els primers els agafen, al menys en part, directament de l'aigua intersticial del sediment, mentre que els segons podrien beneficiar-se, per la seva proximitat al sediment, dels nutrients alliberats per aquest, en part gràcies a les condicions anòxiques (nocturnes o cròniques) que es poden generar en presència de grans biomasses de macròfits marins. Aquest sembla ser, per exemple, el cas de la fanerògama *Halophila ovalis* i *Gracilaria comosa* a l'estuari del Riu Swan, Austràlia occidental (Hillman *et al.* 1995, Astill i Lavery 2001), o fins i tot el del cas citat a les Canàries, de *C. prolifera* amb altres rodòfits ramificats. El cas de la badia dels Alfacs seria, potser, un altre exemple que afegir. Això no vol dir, però, que entre ells no existeixi un cert grau de competència, com semblaria indicar el fet que les seves respectives biomasses siguin complementàries (Figura 5.5).

Anàlisi de causes possibles

Pel que fa a les causes d'aquesta colonització recent, no n'hi ha cap d'evident, encara que aquestes causes semblarien més relacionades amb canvis tèrmics que no pas amb canvis en les concentracions de nutrients. En efecte, si bé és cert que les proliferacions de macroalgues han estat força sovint atribuïdes a l'increment de les concentracions de nutrients (Fletcher 1996, Morand i Briand 1996), això fa referència sobre tot a zones molt someres. No és el cas, per tant, de la zona central de la badia dels Alfacs, on s'hauria de pensar més aviat que un increment de nutrients afavoriria el desenvolupament de fitoplàncton, que impediria l'arribada de la llum al fons (Valiela *et al.* 1997). De fet, seria més lògic pensar que una possible causa de la colonització observada fos la disminució en la concentració de nutrients, malgrat no s'han pogut confirmar estadísticament canvis d'aquesta variable en cap sentit a la badia dels Alfacs (Capítol 1, plana 90 i ss), tot i que si que han estat demostrats recentment per al tram baix del riu Ebre entre els anys 80 i 2004, a partir de 1995-96 (Ibáñez *et al.* 2007). D'altra banda, el possible efecte de la disminució dels nutrients afectaria, com s'ha dit, al fitoplàncton, disminuint la terbolesa de l'aigua, però les dades disponibles tampoc no permeten afirmar que l'aigua de la badia fos més transparent a finals dels anys 90 que a principis.

D'altra banda, en un capítol previ s'ha descrit un increment de temperatura aèria entre 1992 i 1998 (Taula 2.6), i aquest va anar acompanyat d'un increment de les temperatures mínimes de l'aire corresponents als mesos d'hivern (desembre-març; Figura 5.7): les mínimes diàries hivernals van presentar la moda entre 4 i 6 °C en 1992 i 1993 (per comoditat es posa el valor del mig de l'interval, a partir d'ara, 5 °C, en aquest cas), mentre que des de 1994 fins a 1997 la moda de la distribució

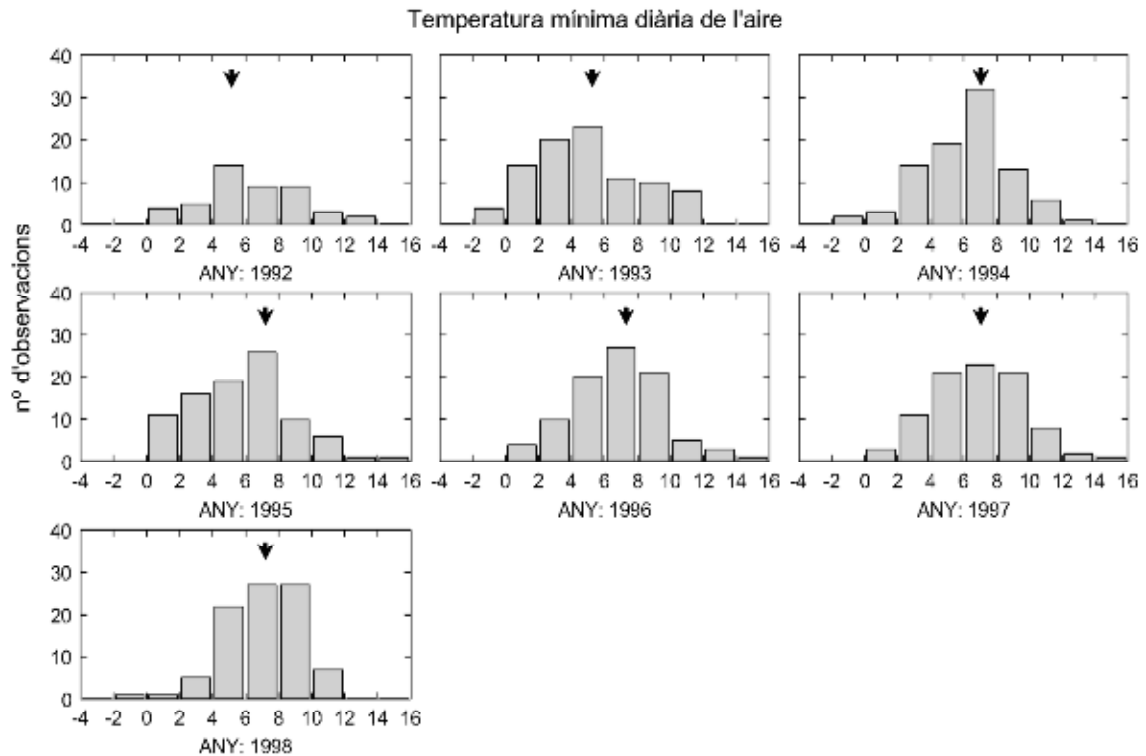


Figura 5.7. Histogrammes de freqüències de temperatures mínimes de l'aire corresponents als mesos d'hivern (desembre-març). La moda de la distribució s'indica amb una punta de fletxa. Les dades procedeixen de l'observatori meteorològic d'Amposta-DARP. Unes temperatures de l'aire de 3.7 i 8.6 °C correspondrien a una temperatura d'aigua fonda de 10 i 13.6 °C, respectivament.

hivernal és de 7 °C, i l'any 1998 sembla que s'apropa cap als 8 °C. S'ha observat, també, que la temperatura aèria mínima diària està correlacionada significativament amb la temperatura aquàtica del fons de la badia dels Alfacs (Figura 2.14), i que la temperatura mínima de l'aigua de fons ha augmentat alguns graus entre 1990 i 1998 (Figura 2.13). Per tant, les pujades de temperatura aèria equivaldrien a un increment de temperatura aquàtica des de valors inferiors als 10 °C fins a prop dels 13 °C. O analitzat d'una altra manera, si sabem que la temperatura de l'aigua de 10 °C es correspon amb una temperatura mínima aèria de 3.7 °C, podem estimar el percentatge de dies en que la temperatura mínima de l'aire es troba per sota aquest llindar. Aquest indicador de duresa hivernal va disminuir des del 31 % dels dies el 1993 fins al 10 % el 1998 (Taula 5.2). *Caulerpa prolifera* sembla una espècie molt influïda per la temperatura. El cicle reproductiu i de creixement d'aquesta espècie és dependent de la temperatura de l'aigua (Meinesz 1980), mostrant la seva major cobertura coincidint amb el màxim tèrmic anual (Sánchez-Moyano *et al.* 2001). A més, Meinesz (1979) va trobar que el creixement de *C. prolifera* s'aturava a temperatures inferiors a 13 °C, i es van relacionar desaparicions massives d'aquesta macroalga amb temperatures hivernals de l'aigua inferiors a 12 °C, arribant a designar la temperatura com el factor preponderant que limita a la Mediterrània l'extensió i distribució geogràfica d'aquesta espècie d'afinitat subtropical (Augier i Robert 1981). Així mateix, Terrados (1991) va trobar una resposta similar en *Caulerpa prolifera* del Mar Menor, Múrcia, suggerint un llindar mínim

per a la supervivència de *Caulerpa prolifera* en 10 °C. Per tant, aquesta relativa suavització de les temperatures hivernals podria explicar l'extensió de *Caulerpa prolifera* a la badia dels Alfacs.

Taula 5.2. Percentatge de dies en què la temperatura mínima de l'aire és igual o inferior del valor crític de 3.7 °C. El període d'hivern inclou els mesos de desembre a març.

any	hivern
1993	30.6%
1994	11.6%
1995	19.0%
1996	9.8%
1997	7.5%
1998	10.0%

Segons aquest raonament, podríem incloure la colonització del fons de la badia dels Alfacs per *C. prolifera* dins la tendència constatada a diferents indrets de la Mediterrània a l'extensió de les àrees de distribució d'espècies termòfiles, i particularment de macroalgues en fondàries similars a les de la badia dels Alfacs (Francour *et al.* 1994).

Pel que fa a *Alsidium corallinum*, hi ha molta menys informació sobre les seves característiques ecològiques. Se sap que és un alga de distribució atlàntico-tropical i mediterrània (Barceló i Seoane-Camba 1989, Guiry i Dhonncha 2001). Ara bé, la manca d'informació més precisa fa que, a hores d'ara, no es pugui relacionar la seva presència amb el canvi tèrmic esmentat.

Les toxines de les macroalgues

El fet que les dues espècies dominants tinguin concentracions elevades de toxines obre la porta a pensar sobre un possible paper dels herbívors com a controladors de la dinàmica de les poblacions macroalgals bentòniques, especialment aquelles que no presentin defenses contra el brostejament. Així, és remarcable el fet de que *C. prolifera* i *A. corallinum* posseeixen toxines que les confereixen una certa protecció contra depredadors: caulerpenina, com a mínim, la primera (Gavagnin *et al.* 1994), que inhibeix la bomba de Na^+/K^+ en neurones (Brunelli *et al.* 1998), i àcid domoic la segona (Impellizzeri *et al.* 1975), un potent neuroamnèsic que provoca la pèrdua de la memòria recent a través de canvis en el metabolisme del Ca^{2+} intracel·lular en neurones (Iverson i Truelove 1994, Nijjar-Mohinder i Nijjar-Satnam 2000). No s'han trobat estudis que investiguin la toxicitat real de macroalgues portadores d'àcid domoic sobre els seus possibles predadors; ara bé, *Alsidium corallinum* és selectivament evitada per brostejadors generalistes de macroalgues. Tal és així que en un estudi recent en que comparaven el grau d'atracció de dos espècies d'invertebrats d'hàbits alimentaris generalistes sobre 20 espècies de macroalgues comuns, *Alsidium corallinum* i una altra alga del gènere *Caulerpa* (*C. racemosa*) eren dues de les algues que es situaven entre les sis menys menjades pels dos invertebrats brostejadors (Granado i Caballero 2001). El fet que les dues espècies

més dominants siguin espècies amb defenses químiques podria no ser casual: la manca quasi absoluta de senyals de mossegades sobre els tal·lus d'aquestes espècies ens indica la baixíssima pressió per part de consumidors, que en canvi sí brostegen, de forma notable, altres espècies de macroalgues presents en el mateix hàbitat, com *Ulva* sp., i *Gracilaria verrucosa*.

Les espècies del gènere *Caulerpa* poden contenir diversos metabòlits secundaris, entre els quals s'ha citat a la bibliografia la caulerpina, la caulerpicina i la caulerpenina (Paul i Fenical 1987). El 1977 es va descriure l'existència d'un pigment groc-ataronjat anomenat **caulerpina**, que es troba present com a mínim en el 50% d'espècies de *Caulerpa*, segons s'havia investigat fins l'any 1983. Si bé aquesta substància va ser considerada inicialment com a un metabòlit bioactiu, estudis posteriors van mostrar que mancava d'efectes significatius. La cita de la presència de **caulerpicina** en algunes espècies del gènere correspon a 1979, i és un dels primers metabòlits tòxics descrits, però més endavant es va trobar que no es correspon amb un sol component pur sinó amb una barreja, pel que es recomana retirar aquest terme de la literatura científica. Alguns estudis van mostrar que ni la caulerpina ni la caulerpicina presenten toxicitat aguda (Higa i Kuniyoshi 2000). Per últim es troba la **caulerpenina**, el metabòlit secundari més tòxic del gènere present en moltes de les seves espècies.

Caulerpa prolifera conté caulerpina malgrat que només en concentracions traça, però no caulerpicina (Vest i Dawes 1983). En canvi, sí conté caulerpenina en quantitats significatives, i va ser la primera espècie del gènere en la que es va aïllar aquest compost tòxic, a part de ser precisament en poblacions del Mediterrani (Amico *et al.* 1978). Tot i la presència d'aquesta toxina, alguns organismes poden alimentar-se, al menys parcialment, de *Caulerpa prolifera*, com per exemple el mol·lusc sacoglòs *Oxynoe olivacea* (present a la badia dels Alfacs), tot descomponent la caulerpenina en dos compostos encara més tòxics (oxitoxines 1 i 2), com a estratègia defensiva (Gavagnin *et al.* 1994). Ara bé, *C. prolifera* no representa la seva major font de carboni, tal i com indiquen les signatures isotòpiques de ¹³C i ³⁴S del mol·lusc i de l'alga, bastant diferents (De Pedro, X., dades no publicades). En qualsevol cas, es creu que aquest metabòlit tòxic no pot pujar per la cadena tròfica (Parent-Massin *et al.* 1996), si bé els mateixos estudis van arribar fins i tot a analitzar la seva potencial toxicitat sobre teixits cel·lulars humans, conclouent que el risc d'intoxicació cutània o alimentària en humans pot ser considerat mínim. Malgrat això, hi ha estudis recents que descriuen la caulerpenina com a substància provocadora de la inhibició de la bomba de Na⁺/K⁺ en neurones (Brunelli *et al.* 1998), fet que assenyala el greu perill potencial que presentaria aquesta toxina si per qualsevol raó arribés a entrar en contacte amb el medi intern de l'organisme i fos distribuïda al teixit nerviós.

Alsidium corallinum, per altra banda, conté àcid domoic (Impellizzeri *et al.* 1975). Fa vàries dècades que es va descriure que els habitants d'unes illes del Japó consideraven aquesta substància com a tònic molt útil per les seves propietats antihelmíntiques (Daigo 1959). Però, sobre tot, aquesta toxina va esdevenir coneguda especialment després de que a 1987 s'observessin a Canadà centenars de casos de malalties relacionades amb el consum de musclos recol·lectats de l'Illa de Prince Edward. Es va identificar llavors l'àcid domoic com a contaminant responsable en els musclos i alhora es va

aïllar també de les poblacions fitoplanctòniques de *Nitzschia pungens* de les aigües circumdants (Bates *et al.* 1989). Des de llavors s'han fet molts estudis i se'n continuen fent per analitzar els riscos de toxicitat d'aquesta substància a causa de "blooms" naturals fitoplanctònics i els límits de toxicitat s'han descrit amb certa precisió (Iverson i Truelove 1994). Ara bé, resta desconegut el perill potencial de l'àcid domoic contingut en teixits de macroalgues, ja que es coneix la seva presència també en altres macroalgues com el també rodòfit *Chondria armata* (Daigo 1959), però es desconeix la seva capacitat d'alliberar-se al medi a través de exudats de matèria orgànica o per descomposició de la macroalga. Estudis preliminars sobre la concentració d'aquesta toxina neuroamnèsica apunten que es troba en concentracions elevades en teixit fresc d'*Alsidium corallinum* de la badia dels Alfacs (Invers i De Pedro 2001), però resta desconegut encara el risc real de que es pugui transmetre aquesta toxina a través de la cadena tròfica, i si pot haver-hi algun risc per la salut, per exemple, a través dels cultius marins a la badia.

Importància de la colonització

Es desconeix si la colonització detectada a és l'inici del poblament perdurable o bé és una invasió ocasional. Caldrà esperar a veure què succeeix en els pròxims anys¹². I caldrà realitzar experiments específics per refermar la hipòtesi més versemblant per ara, de que el factor clau de la colonització, si més no de Caulerpa, ha estat la suavització de la temperatura mínima hivernal. En cas de que la hipòtesi sigui certa i es mantingui la pujada global de les temperatures, és d'esperar que les macroalgues passin a ser pobladors habituals del fons de la badia dels Alfacs, amb el que es constatarà que la colonització actual ha estat l'inici d'un canvi important a la badia. Si resulta que en pocs anys minven i/o desapareixen els poblaments macroalgals, s'entendrà la colonització actual com part d'unes fluctuacions encara no massa conegudes.

De totes formes, mentre duri aquesta colonització, es pot parlar de que s'ha produït un canvi notable no tant sols pel bentos sinó pel conjunt de la badia. A demés d'influir en els aspectes ja comentats en la introducció, de manera molt específica i rellevant pels objectius d'aquesta tesi, la cobertura algal esdevé un element de la màxima importància pels balanços d'oxigen. Aquest aspecte clau es tracta en detall en la següent secció d'aquest capítol.

¹² En un moment més actual (2003-2006), la presència de macroalgues al fons de la cubeta és encara notable (J. Diogene, *com. pers.*), malgrat *Alsidium corallinum* sembla més escàs, a partir de mostres puntuals (M. Pérez, *com. pers.*).

Subcapítol 5.B. Metabolisme d'oxigen del Bentos

Subcapítol 5.B. Metabolisme d'oxigen del Bentos

5.2. Introducció

El bentos sol ser un component consumidor net en el balanç d'oxigen d'ecosistemes marins, inclús en els de poca fondària (Nixon 1981), llevat dels casos on hi ha una marcada abundància de macròfits. El bentos de la badia dels Alfacs era efectivament heterotròfic quan els únics organismes fotosintètics de la cubeta eren les algues microscòpiques (Camp *et al.* 1991). Calia ara esbrinar quina era l'aportació d'aquests macròfits nou-vinguts al balanç d'oxigen, raó per la qual s'analitza i discuteix, en aquesta secció del capítol, el rol de les macroalgues en el balanç d'oxigen del bentos, a través de

- (1) l'obtenció de corbes fotosintesi – irradiància al llarg de l'any i la seva aplicació a avaluar la producció i consum d'oxigen, conegut l'ambient lumínic (inclús l'autoombra dels macròfits).
- (2) mesures de producció i consum d'oxigen *in situ* de tota la comunitat bentònica amb l'ajut d'un nou model de campana d'incubació de sediment,
- (3) càlculs del balanç general d'oxigen per al bentos, a la llum dels resultats previs de laboratori i de camp.

Un primer pas per assolir aquest objectiu va ser analitzar la fotosintesi de les espècies fitobentòniques dominants. La majoria d'estudis d'aquests tipus en zones temperades s'han concentrat en una espècie singular d'un determinat estrat de la comunitat (Hatcher 1977, Murase *et al.* 1989, Gao 1990, Levitt i Bolton 1990). Treballs similars han mostrat que la producció fotosintètica de macroalgues és altament variable (Levitt i Bolton 1990), per diverses raons: una espècie pot mostrar diferències significatives de les velocitats fotosintètiques entre les seves diferents parts (Littler i Arnold 1980, Gerard 1986, Sakanishi *et al.* 1991), al llarg de la seva vida o entre fronds fèrtils i fronds vegetatius (Littler i Arnold 1980), a diferents hàbitats (Koehl i Alberte 1988), i al llarg d'un cicle estacional (Littler i Arnold 1980, Gao 1990, Sakanishi *et al.* 1990; i posteriorment, Duarte i Ferreira 1995, De Casabianca i Posada 1998). A més, les variacions estacionals es poden atribuir tant a diferències de temperatura com d'estat nutricional, de règim lumínic i també a processos de la història vital de l'alga en qüestió (Wheeler 1980, Beer i Eshel 1983). Les velocitats fotosintètiques també varien, òbviament, entre les diferents espècies, i per a un mateix habitat s'ha trobat diferències de fins a 2 ordres de magnitud que es troben relacionades amb la forma funcional o morfologia de les algues (Littler i Arnold 1982). Per últim aquestes velocitats fotosintètiques també són influïdes per l'ombra produïda per cada alga sobre les seves veïnes, procés conegut com a "autoombra", que pot ser altament variable ocasionalment entre espècies dins un mateix gènere (Ménesguen 1992, Bendoricchio *et al.* 1994, Solidoro *et al.* 1995, Kamermans 1996).

Un altre element que és necessari analitzar, especialment en fons sedimentaris que reben un constant aport de nutrients i matèria orgànica és la respiració de la resta de la comunitat, sobre tot els del sediment (Viaroli *et al.* 1995, Neira i Rackemann 1996, Martins *et al.* 1997). A la badia dels Alfacs ja existien estudis de la respiració del sediment, quan no hi havia macroalgues (Vidal *et al.* 1989,

Vidal *et al.* 1997, tots dos amb dades dels anys 80). Ara hem dut a terme noves estimacions del consum d'oxigen de la tota la comunitat bentònica, incloent els nous organismes associats a les macroalgues.

Amb aquestes dades es pot calcular un balanç d'oxigen, i analitzar en quins moments els termes de sortida d'oxigen dissolt del sistema són superiors als d'entrada, etc. A més, es pot quantificar la influència de modificacions en factors ambientals clau sobre el balanç global del bentos. Així, hem analitzat numèricament algunes situacions clau de risc d'hipòxia sota condicions simulades de clima lumínic que arriba a les macroalgues, i de renovació de l'aigua de fons, atès que aquests dos són factors que estan fortament relacionats amb la dinàmica d'oxigen de tot el bentos i la generació o manteniment d'hipòxies en l'ecosistema (Welsh *et al.* 1985, Romero *et al.* 1996, Valiela *et al.* 1997).

Respecte el clima lumínic no s'han trobat gaires estudis que quantifiquin el grau d'influència de la reducció de la llum subaquàtica produïda pel pas de fronts amb núvols densos, malgrat se sap que aquests filtren en mitjana per molta part d'Europa a l'estiu entre el 50 i el 80% de la llum (Monteith 1973) i puntualment reduccions de fins el 90% a la badia dels Alfacs (De Pedro, dades no publicades). Per aquesta raó, tindrà un cert interès incloure l'efecte de la coberta de núvols i la durada de la seva presència sobre el balanç bentònic d'oxigen. Respecte la renovació de l'aigua de fons (veure Capítol 1, plana 142), es considerarà aquí només la situació de possible estancament de la massa d'aigua del fons, com a situació eventual extrema de finals d'estiu.

Tots aquests resultats, finalment, permeten fer una primera incursió en l'anàlisi de l'efecte de les macroalgues sobre la dinàmica d'oxigen de l'ecosistema en els mesos de major probabilitat d'aparició d'hipòxies a la badia dels Alfacs, que es discutirà al final del present capítol.

5.2. Metodologia

Corbes Fotosíntesi-Irradiància (F-I) al laboratori.

Es van agafar mostres algals en apnea o amb escafandre autònom d'aproximadament 200 g PF de cadascuna de les dues espècies dominants (*Caulerpa prolifera* i *Alsidium corallinum*) de la cubeta de la badia, més o menys cada dos mesos durant 1997 i 1998. Es van col·locar en contenidors amb d'aigua de mar mentre es transportaven al laboratori i allà es van col·locar airejadors fins realitzar els experiments F-I, entre el dia següent i tres dies després de la recollida al mar. Les corbes F-I es van obtenir incubant entre 50 i 100 mg PS de *C. prolifera* i d'entre 100 i 200 mg PS d'*A. corallinum* a 8 irradiàncies diferents (0, 40, 70, 165, 200, 314, 425 i 850 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) en un incubador a temperatura controlada en ampolles de vidre de prop de 100 ml (Figura 5.8a). Per a cada condició experimental es van fer tres rèpliques. La font de llum estava constituïda per 12 fluorescents de llum blanca de 120 cm de llarg (marca PHILIPS TLD 36W/54); per tal de que cada ampolla rebés la irradiància desitjada, es van usar filtres neutres. Les incubacions de laboratori es van realitzar a temperatures properes a les de la badia en cada cas i en constant agitació magnètica per trencar possibles gradients químics dins l'ampolla durant la incubació.

Després d'una hora d'incubació es va mesurar la concentració d'oxigen amb un oxímetre (marca WTW OXI196, Figura 5.8b); aquesta concentració final va ser comparada amb la concentració d'oxigen mesurat en ampolles control (sense macroalga). Els fragments d'alga incubats es van assecat i pesar (24 h a 75 °C). Aquest mètode ha estat emprat per determinar la fotosíntesi de fanerògames marines amb bons resultats (Alcoverro *et al.* 1998).

Les dades es van ajustar a la següent equació (Pérez i Romero 1992):

$$\text{Producció Neta d'O}_2 = \frac{P_m^{\text{mac}} (I - I_c)}{I_{\text{sat}} + (I - I_c)} \quad \langle 5.2 \rangle$$

on P_m^{mac} és la producció primària neta màxima, o en condicions de llum saturants (en $\text{mg O}_2 \text{ g PS}^{-1} \text{ h}^{-1}$), I_{sat} és la irradiància de saturació, I_c és la irradiància de compensació i I és la irradiància considerada (les tres darreres, en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Càlcul de la irradiància al camp

La radiació solar aèria va ser obtinguda per dos mètodes diferents, depenent de l'ús de les dades. Per una banda, va ser calculada a partir de les mesures de radiació solar a l'estació meteorològica d'Amposta-DARP, transformant els W m^{-2} amb coeficients de correlació empírics en irradiància quàntica subsuperficial (sensor esfèric, veure Capítol 1, plana 70 per més detalls). L'altre aproximació va ser fer servir procediments estàndard per calcular la radiació solar sense núvols per a qualsevol dia de l'any i latitud del planeta, tenint en compte l'elevació solar i la reflexió de la seva llum sobre la superfície de l'aigua (Kirk 1983, Skartveit i Olseth 1988) i convertir-les posteriorment en radiació

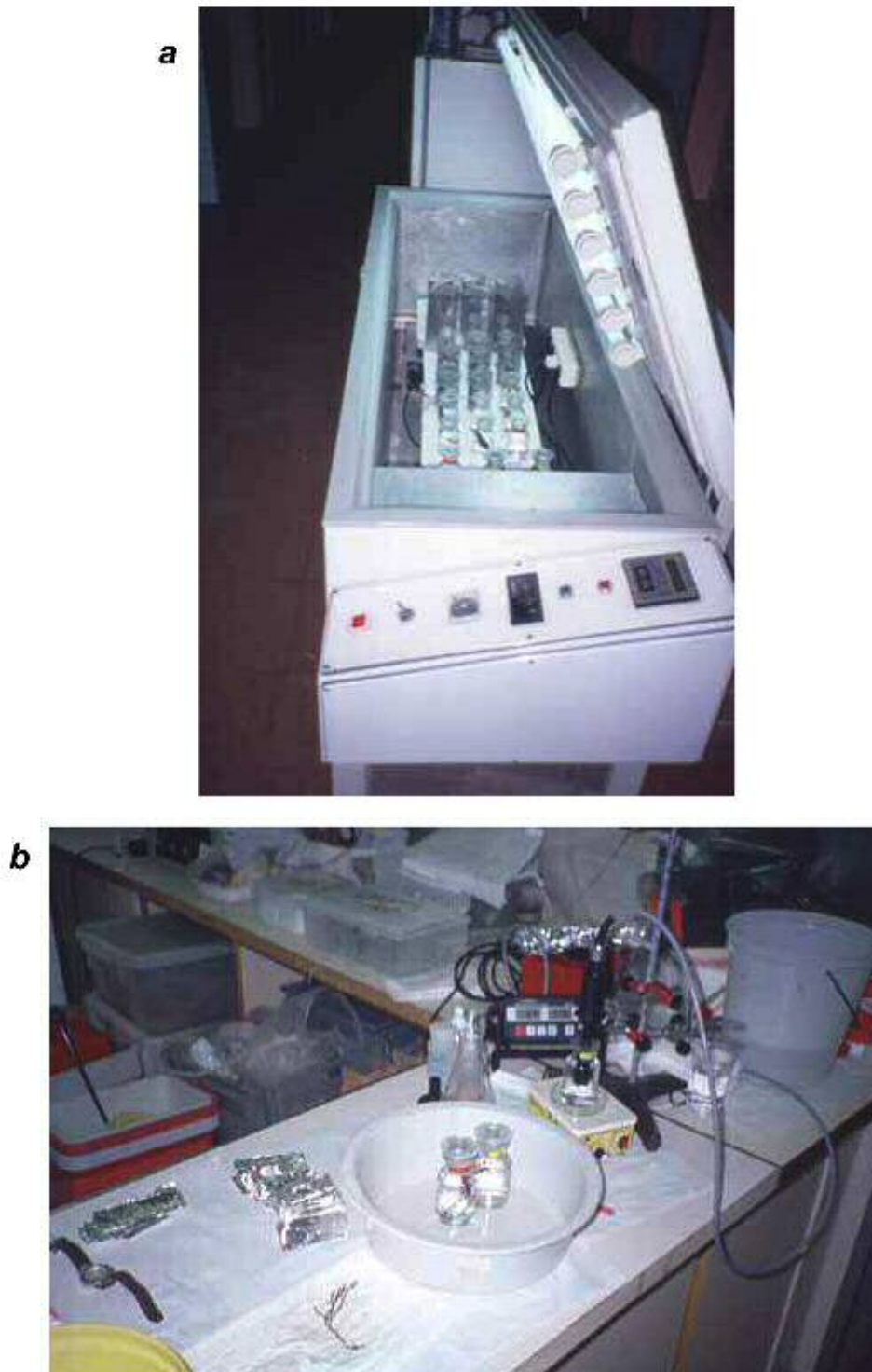


Figura 5.8. Incubacions fotosintesi-irradiància al laboratori: (a) Arcó incubador amb les ampolles dels experiments de fotosintesi irradiància. Les diferents irradiàncies s'aconsegueixen per distribució en zones amb il·luminació diferencial dins l'arcó i per l'addició de filtres reductors de la irradiància a sobre de les ampolles que així ho requereixen. (b) Detall de les ampolles d'incubació, oxímetre i agitador magnètic portàtil de camp i laboratori. El filament sobre la taula correspon a *Alsidium corallinum*.

fotosintèticament activa emprant el factor empíric $1 \text{ W m}^{-2} = 4.61 \mu\text{mol fotons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Valiela 1995). El primer mètode ens dona valors de dades d'irradiància el més propers possibles als que hi havia *in*

situ, mentre que el segon mètode ens permet reproduir numèricament condicions d'irradiància a partir de valors prefixats de nuvolositat, entre altres variables, i analitzar el balanç d'oxigen del bentos esperat per als escenaris que es considerin.

En tots dos casos, la irradiància quàntica fotosintèticament activa ($\mu\text{mol fotons m}^{-2} \text{s}^{-1}$) arribant al fons va ser calculada extingint la llum a la columna d'aigua segons la llei de Beer-Lambert (Capítol 1, plana 72). En aquest cas, però, el coeficient d'extinció de la llum en fondària (K_z) s'ha expressat en base mensual, enlloc de setmanal com s'havia fet en els resultats mostrats en l'anterior capítol, per no disposar de dades setmanals però sí mensuals d'altres variables relacionades. A més, com existeixen diferències significatives de K_z entre les estacions de mostreig a partir de les dades de 1997 (ANOVA dos factors, $F=4.01$, 37 g.l.l., $p<0.05$), s'han calculat les irradiàncies de forma separada per cada estació. Per tal d'atribuir un valor d'extinció per a cada mes, els mesos en que no es disposava de dades (Figura 2.4) es van equiparar l'extinció de la llum als mesos adjacents (gener equiparat al de febrer de 1997, i novembre i desembre equiparats als resultats d'octubre del mateix any, Figura 5.13).

Autoombra de les macroalgues

Es pot considerar que la irradiància subaquàtica, en travessar una mata de macròfits, s'extingeix segons una funció exponencial negativa, anàloga a la que segueix la llei de Beer-Lambert. En el cas de l'extinció en travessar una mata algal, o una coberta foliar en un bosc, la variable independent no és la fondària sinó la biomassa (o bé l'índex foliar en el cas de boscos: llei de Monsi-Saeki, veure esquema de la Figura 5.9):

$$I_b = I_0 e^{-(K_b B)} \quad \langle 5.3 \rangle$$

on I_0 és la irradiància en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ després de travessar la biomassa macroalgal B (en g PS m^{-2}), I_∞ representa la irradiància just abans de començar a travessar la mata algal, i K_b és el coeficient d'extinció de la llum específic per la biomassa ($\text{m}^2 \text{g}^{-1} \text{PS}$).

El coeficient d'extinció de la biomassa es va determinar construint una acumulació d'*Alsidium corallinum* d'uns 30 cm de gruix, mantinguda per un recipient metàl·lic cilíndric de 25 cm de diàmetre. Es va mesurar la irradiància subaquàtica just a sota i a sobre d'aquesta acumulació i les mesures es van repetir traient-ne el 20%, el 40%, el 60% i el 80% i el 100% de la biomassa algal. Aquest procés es va fer dues vegades a dos llocs diferents, fent-se la mitjana dels valors obtinguts de coeficient d'extinció de la llum en travessar la massa macroalgal.

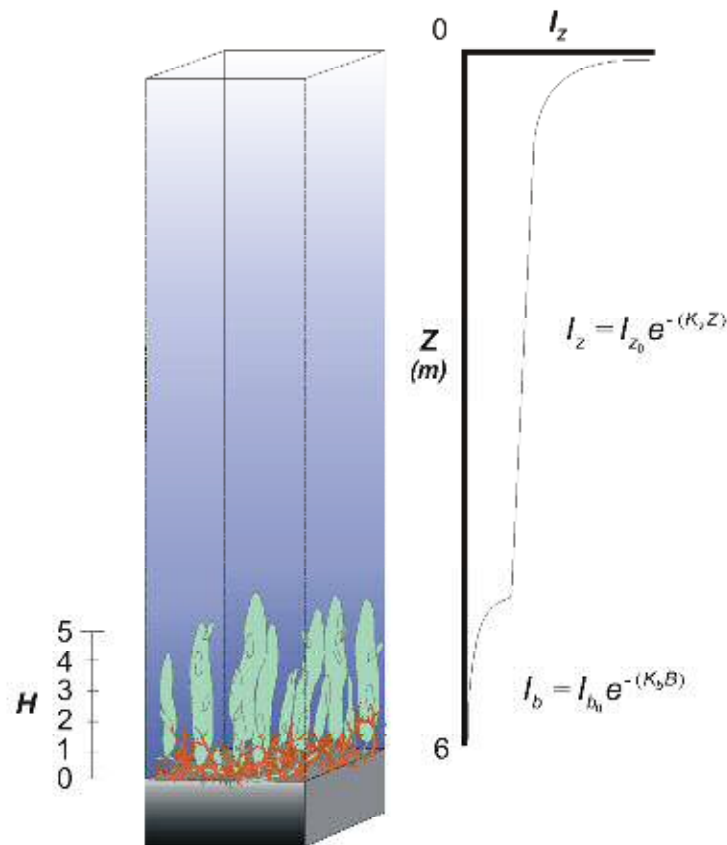


Figura 5.9. Esquema de l'extinció de la llum en fondària primer i en funció de la biomassa de la mata algal després, amb les equacions emprades. Les dimensions de la columna d'aigua i de les macroalgues no estan fetes a la mateixa escala. I_z = irradiància subaquàtica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a la fondària z (m), I_{z_0} = I_z subsuperficial, K_z = coeficient d'extinció de la llum a la columna d'aigua, I_b = irradiància subaquàtica després de travessar una capa de macroalgues bentòniques de biomassa B (g PS m^{-2}), I_{b_0} = I_b just abans de travessar la capa de macroalgues, K_b = coeficient d'extinció de la llum en funció de la biomassa macroalgal, H = alçada sobre el sediment (unitats arbitràries).

Producció primària de les macroalgues

Es va estimar l'evolució al llarg de l'any del nombre d'hores al dia en que les macroalgues es troben a llum saturant (H_{sat}) i per tant a producció màxima (Dennison i Alberte 1985), com una aproximació a les condicions de llum a que estan sotmeses les algues bentòniques. Aquest càlcul s'ha fet per la llum incident a la part més alta de la bòveda algal.

Es va calcular el balanç fotosintètic de les macroalgues a partir de la biomassa, la irradiància incident i els paràmetres fotosintètics amb els resultats de les mesures *in situ* i dels experiments de laboratori efectuats en cada cas. Als mesos per als quals no es va realitzar incubació, se'ls ha assignat el valor dels paràmetres fotosintètics del mes amb dada més proper. L'equació <5.2> dona producció neta (PN), que per a una irradiància de zero equival a la respiració en fosc (R). La producció bruta (PB) obtinguda com la suma de PN i R, està expressada per unitat de biomassa, i es va expressar per unitat d'àrea fent les conversions oportunes.

Per incorporar a les estimes l'efecte de l'autoombra, la biomassa algal present a cada moment es va dividir, a efectes de càlcul, en 10 nivells, calculant-se la llum incident a cada un d'ells, segons l'equació 0.2 i estimant-ne la producció amb aquesta llum introduïda a l'eq. <5.2>. Finalment, s'ha agafat el sumatori de totes elles com la producció total ($\text{mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$). Per evitar confusions amb altres noms de variables en propers capítols, s'ha cregut oportú especificar que es tractava de producció primària bruta i neta de les macroalgues (PPB_{mac} , i PPN_{mac} , respectivament).

Incubacions in situ

La forma, i en general, el disseny dels recipients emprats en incubacions per determinar el metabolisme bentònic, han estat objecte d'anàlisi i fins i tot de controvèrsia. Malan i McLachlan (1991) van publicar una revisió exhaustiva sobre el tema, seguint les indicacions de la qual es van dissenyar els recipients incubadors ("campanes") fets servir en aquest treball. Es va triar la forma cònica (Figura 5.10), que maximitzés la relació superfície / volum¹³, i es van emprar materials tous que permetessin que el propi moviment de l'aigua exterior ajudés a trencar els gradients del seu interior. Aquestes campanes constaven d'un cos cilíndric de PVC rígid de 31 cm de diàmetre i 15 cm d'alt, trobant-se enganxat en la part superior, un con de PVC flexible de 0.15 mm de gruix i 32 cm d'alçada, que acabava en un petit orifici per on es mantenia inserida una cànula de plàstic rígid transparent de 25 cm de longitud. Aquest tub de plàstic contenia forats cada cop més abundants com més lluny del seu extrem superior. L'orifici superior del tub es podia obrir i tancar amb l'ajut d'un tap cònic de goma. A través d'aquesta obertura s'extreien les mostres d'aigua inicial i final de la incubació. Per realitzar les incubacions, el cos rígid basal de la campana es clavava fins deixar 5 cm d'alçada del cilindre rígid fora del sediment. El volum d'aigua tancat al seu interior era 11 l i la superfície abastada de 755 cm². El con de PVC flexible permet que el corrent marí pugui moure l'aigua tancada en el seu interior, trencant o apaivagant els gradients que s'hi poguessin formar. També permet que en extreure el volum de 100 ml d'aigua (per cada mostreig de la concentració d'oxigen dissolt al seu interior) no es generi una pressió negativa dins la campana, que podria estimular un flux d'aigua intersticial cap a l'interior de la campana. Un experiment preliminar de difusió molecular d'oxigen a través del plàstic flexible de la campana va indicar que aquest flux era menyspreable (de l'ordre de 0.05 mg l⁻¹ h⁻¹, per gradients de 4 mg l⁻¹ en 8 cm, valors de gradient superiors o com a molt similars als que es podien donar *in situ*).

Per cada incubació, d'entre 2 i 3 h de durada, es van utilitzar tres campanes fosques per cada estació de mostreig el mateix dia o en dies successius. En acabar la incubació, les algues de l'interior de cada recipient van ser recol·lectades i transportades al laboratori on es va determinar el seu pes sec. Es van realitzar incubacions a les estacions *Boca*, *Mig* i *Cua*, les dates 7 de març, 24 d'abril, 11 de juny, 7 de juliol i 1 d'octubre de 1997, i 16 de febrer i 17 de setembre de 1998.

¹³ superfície de sediment / volum d'aigua tancat dins la campana



Figura 5.10. Campanes d'incubació de sediment (disseny propi). La campana s'enterra fins a una cota de 5cm de fondària del cilindre rigid, amb l'ajut de les nanses laterals que porta acoblades. El volum tancat al seu interior per aquest procés és d'11 l i la superfície plana és de 755 cm². El con de PVC flexible permet que el corrent marí pugui moure l'aigua tancada en el seu interior trencant els possibles gradients que s'hi poguessin formar eventualment.

La incubació del bentos en conjunt dóna una estima neta del metabolisme de tots els components. Aquí només s'utilitzaran els resultats de les incubacions per estimar la respiració del sediment. Per això, es va ajustar una recta entre els valors de respiració teòrica de les macroalgues (variable independent, R_{mac}), i la respiració observada (R_{obs}), de la forma:

$$R_{obs} = aR_{mac} + R_{sed} \quad <5.4>$$

R_{mac} prové de multiplicar a la biomassa d'algues de les campanes la respiració trobada al laboratori a través de les corbes F-I, i R_{obs} correspon a la respiració observada *in situ* amb les campanes d'incubació de sediment. L'abscissa a l'origen (R_{sed}) és la respiració estimada amb biomassa algal nul·la, i per tant, la respiració del sediment (Figura 5.17).

Simulació dels balanços bentònics a finals d'estiu

S'ha considerat específicament el cas de finals d'estiu (setembre) per quantificar els efectes de la biomassa algal, la cobertura de núvols i la terbolesa de l'aigua sobre el balanç bentònic d'oxigen per a l'estació *Cua*, la més susceptible de patir anòxia (Camp 1994). No s'han tingut en compte altres elements del balanç total, com ara la producció planctònica, ni l'intercanvi amb l'atmosfera, o l'aport per barreja o circulació estuària, que s'integren i analitzen en el darrer capítol de la tesi.

Per tal de calcular el balanç diari net d'oxigen s'ha agafat el consum net de sediment, estimat a partir dels resultats per al mes de setembre i considerat constant, alhora que s'han manipulat les altres variables, creant diferents escenaris tant de biomassa algal com de llum incident. Per la biomassa

s'han considerat els valors de 0, 10, 100, 300 i 600 g PS m⁻² (dins el rang de valors observats *in situ*). Pels nivells d'irradiància es van considerar 5 situacions diferents, a partir de combinar determinats percentatges de reducció de llum a causa dels núvols amb determinades terboleses de la columna d'aigua (k_z). Així, els nivells d'irradiància considerats van ser:

- (I1) aigua clara ($k_z = 0.3 \text{ m}^{-1}$) + sense núvols (0 %);
- (I2) aigua clara ($k_z = 0.3 \text{ m}^{-1}$) + nuvolositat alta (50 %);
- (I3) aigua mig tèrbola ($k_z = 0.45 \text{ m}^{-1}$) + nuvolositat mitjana (25 %);
- (I4) aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 \text{ m}^{-1}$) + sense núvols (0 %);
- (I5) aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 \text{ m}^{-1}$) + nuvolositat alta (50 %).

En aquests càlculs s'ha considerat que l'àrea en contacte amb el sediment del compartiment *Cua fons* és de $10.8 \times 10^6 \text{ m}^2$, i que els volums de les estacions *Mig Fons*, *Cua fons* i *Cua Sup* són 27×10^6 , 25×10^6 i $33 \times 10^6 \text{ m}^3$ respectivament (De Pedro, dades no publicades). Sota aquest escenari s'ha calculat el nombre de dies necessari per arribar a valors d'oxigen dissolt de $2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$, valor entre el que es pot considerar hipòxia i anòxia, segons els autors (veure Introducció general, plana 4 per més informació).

5.2. Resultats

Corbes F-I: paràmetres fotosintètics

Les corbes F-I (Figura 5.11) mostren una variabilitat notable. Així, la producció màxima (P_m^{mac}) de *Caulerpa prolifera* és superior al llarg de tot el període de mostreig a la d'*Alsidium corallinum* (Figura 5.12a), arribant a màxims de 10.3 i 2.7 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ en el més de juny cada espècie, respectivament. La irradiància de saturació (I_{sat}) de *C. prolifera* té un màxim de 480 μmol m⁻² s⁻¹ l'abril de 1997 amb valors propers a 100 la resta de l'any (Figura 5.12b), mentre que *A. corallinum* presenta el seu màxim (280 μmol m⁻² s⁻¹) a principis de març de 1997, i té valors mínims inferiors als 100 μmol m⁻² s⁻¹ a partir de la tardor del mateix any. L'evolució de la irradiància de compensació (I_c) segueix un patró similar al de la I_{sat} , trobant-se entre 13 i 95 μmol m⁻² s⁻¹ per *C. prolifera*, i entre 20 i 69 μmol m⁻² s⁻¹ per *A. corallinum* durant el període mostrejat (Figura 5.12c). La respiració del cloròfit és entre 0.6 i 1.2 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ i la del rodòfit entre 0.2 i 0.7 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ (Figura 5.12d), amb un mínim a maig per les dues espècies.

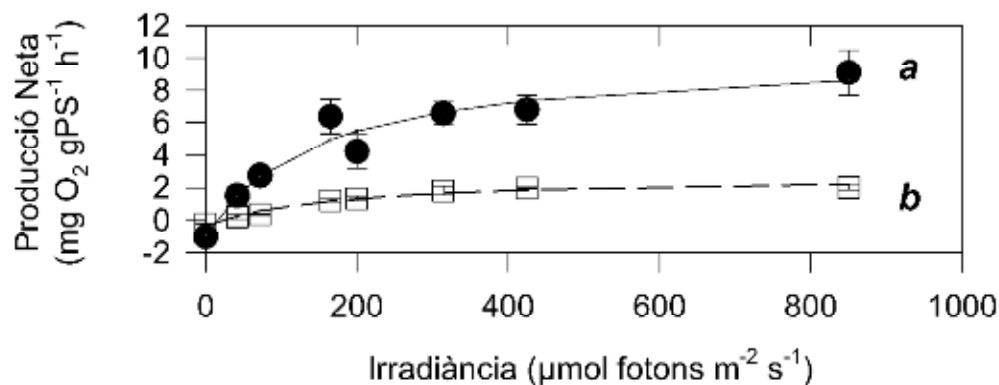


Figura 5.11. Exemple de corba fotosíntesi irradiància (F-I). Cada punt és el promig de 3 rèpliques. (A) *Caulerpa prolifera*, (B) *Alsidium corallinum*.

Extinció de la llum amb la fondària i la biomassa

El coeficient d'extinció de la llum en fondària és força similar entre les estacions *Mig* i *Cua* al llarg de l'any, mentre a l'estació *Boca* és inferior a l'hivern i superior a finals d'estiu i inicis de tardor (Figura 5.13), respecte les dues altres. Altres aspectes del coeficient d'extinció de l'aigua ja s'han comentat al Capítol 1 (plana 78 i ss).

El coeficient d'extinció de la llum amb la biomassa algal, mesurat en mates d'*A. corallinum*, oscil·la entre 0,00296 m² g⁻¹ PS i 0,00252 m² g⁻¹ PS, amb un valor mitjà de 0,00274 m² g⁻¹ PS. La irradiància que arriba a dalt de la mata algal oscil·la entre les poques desenes de μmol m⁻² s⁻¹ a l'hivern i a prop dels 400 μmol m⁻² s⁻¹ a primavera (Figura 5.14a); l'extinció per part de les pròpies algues fa que la irradiància que arriba a sota de la mata macroalgal sigui d'entre el 15 i el 50% del que hi ha a la part

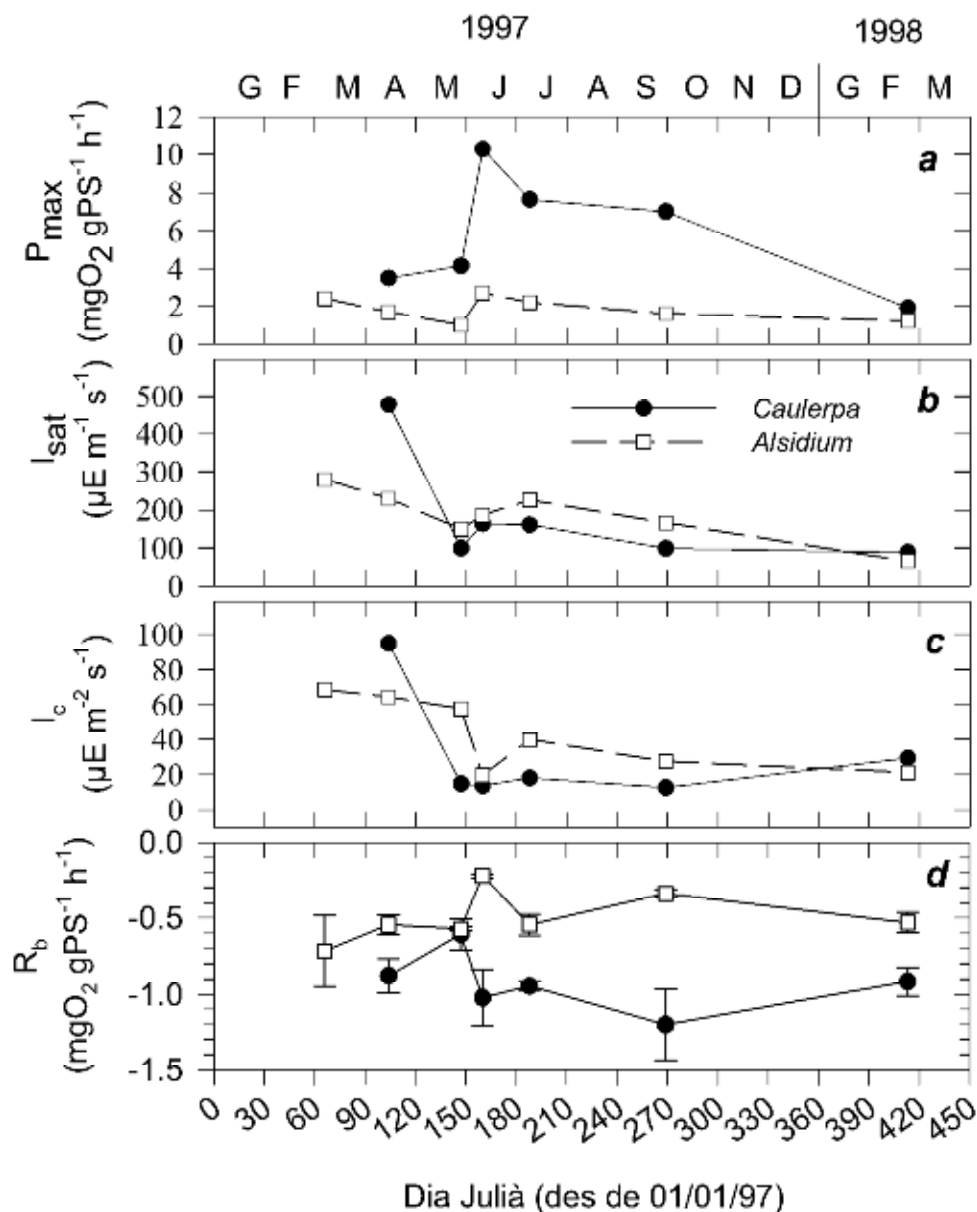


Figura 5.12. Evolució dels paràmetres fotosintètics de les corbes F-I i de les taxes de respiració mesurades: (a) Taxa de producció màxima, P_m^{mac} , (b) Irradiància de saturació, I_{sat} , (c) Irradiància de compensació per l' O_2 , I_c , (d) Respiració per unitat de biomassa, R_b . ($1\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 1\mu\text{mol fotons m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

superior de la volta¹⁴ algal (Figura 5.14b, Taula 5.3). Això vol dir, si expressem aquests valors respecte la llum incident a superfície, que sobre la mata algal arriba entre el 2 i el 16% d'aquesta, (Figura 5.14c), i la que arriba al sediment és d'entre l'1% i el 9% (Figura 5.14d).

¹⁴ "volta algal" = traducció de l'anglès "algal canopy", o del castellà "bóveda algal", No s'ha trobat una expressió millor en català, tot i que s'és conscient que pot sobtar la paraula "volta" en aquest context, per designar l'estructura de la comunitat algal formada per totes els fronds i filament de les algues, en similitud a la zona corresponent al conjunt de capçades dels arbres d'un bosc.

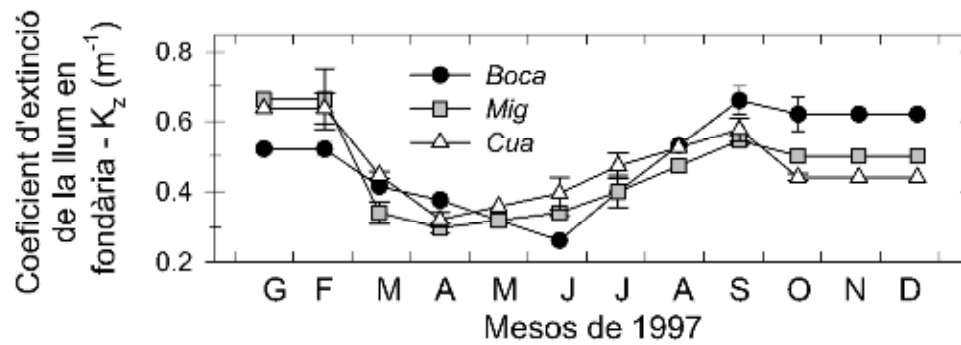


Figura 5.13. Coeficient d'extinció de la llum en fondària (K_z , en m^{-1}) emprada per al càlcul de balanços d'oxigen anuals i de finals d'estiu. Es mostren les mitjanes mensuals (\pm error estàndard) per cada una de les tres estacions de mostreig (*Boca*, *Mig* i *Cua*).

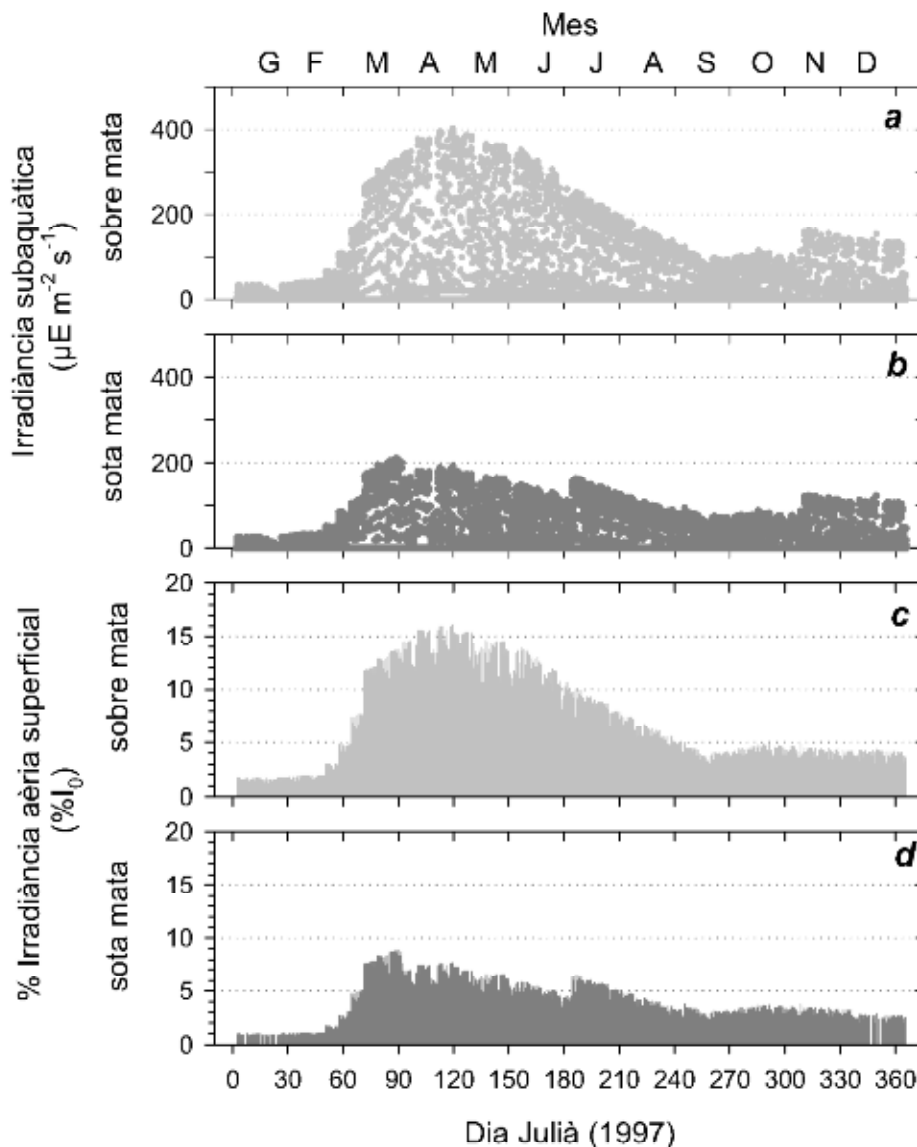


Figura 5.14. Irradiància instantània subaquàtica al llarg de 1997: (a) sobre la mata de macroalgues, (b) sota la mata. També es presenta el percentatge d'irradiància aèria superficial ($\%I_0$) que arriba: sobre la mata de macroalgues, (d) sota la mata. Per aquests càlculs s'ha pres una biomassa mitjana per a l'estació *Cua* de $100-300 \text{ g PS m}^{-2}$ de mata macroalgal, amb una $K_b = 2.74 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} \text{ PS}$ (veure més detalls en el text).

Taula 5.3. Irradiància subaquàtica (I_b) que travessa la mata de rodòfits ramificats en funció de la seva biomassa acumulada (Biom), per a diferents nivells d'irradiància incident a sobre seu. Per al seu càlcul s'ha fet servir el coeficient d'extinció de la llum respecte la biomassa algal de $+0.00274 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} \text{ PS}$.

Biom g PS m^{-2}	I_b $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$				
	600	300	100	50	10
0	600	300	100	50	10
10	584	292	97	49	10
50	523	262	87	44	9
100	456	228	76	38	8
300	264	132	44	22	4
700	88	44	15	7	1

El nombre d'hores diàries a saturació (H_{sat}), calculat a partir de la llum que arriba sobre la mata algal, és màxim (12 h) a finals de primavera, i mínim (0 h) a finals d'estiu (Figura 5.15a i c). Cal ressaltar el cas d'*Alsidium corallinum*, espècie per a la qual H_{sat} és zero des de finals d'Agost fins a Novembre. Per ambdues espècies H_{sat} és zero durant prop del 30% de dies de l'any (Figura 5.15b i d), essent lleugerament superior aquest percentatge a *A. corallinum* respecte *C. prolifera*.

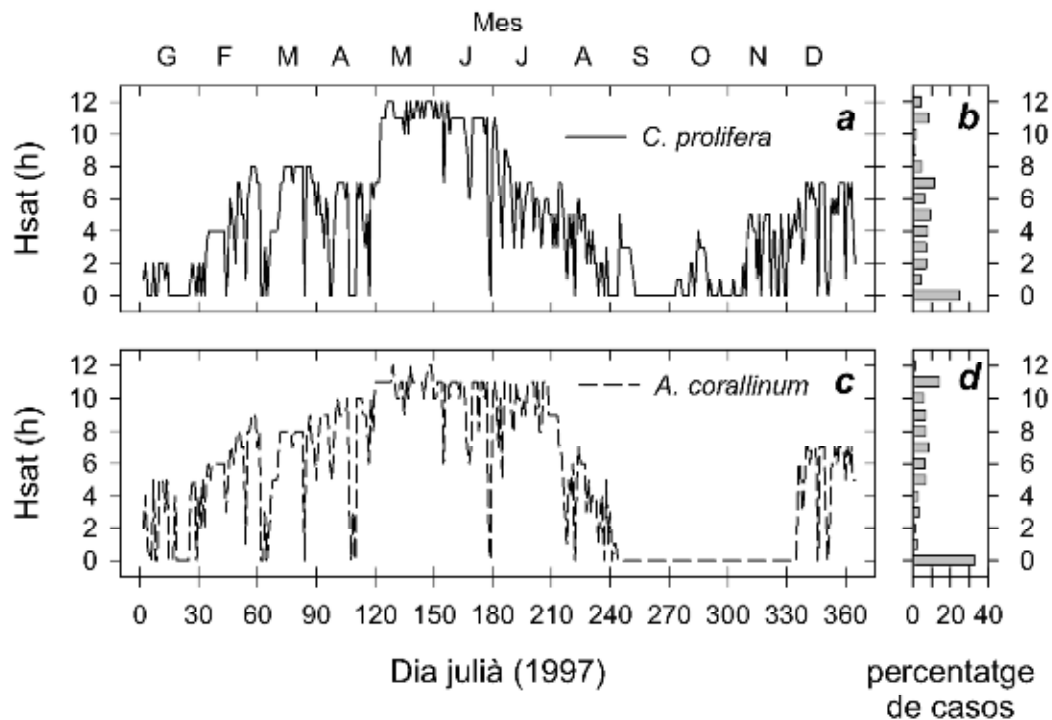


Figura 5.15. Nombre d'hores d'exposició a llum saturant, H_{sat} al llarg de 1997, a la fondària de la mata macroalgal $z = 5.5 \text{ m}$ a l'estació *Mig*: (a) nombre d'hores d'exposició al dia per *Caulerpa prolifera*, i (b) el seu percentatge de dies de l'any corresponent a cada H_{sat} , (c) nombre d'hores d'exposició al dia per *Alsidium corallinum*, i (d) el seu percentatge de dies.

Balanç fotosintètic de les macroalgues

La producció primària bruta (PPB_{mac}) calculada presenta un màxim en juny per ambdues espècies (Figura 5.16). *A. corallinum* mostra una major producció a l'estació *Cua* que a *Mig*, i *C. prolifera* mostra a *Mig* una producció superior a la de *A. corallinum* i també superior a la de l'estació *Boca*. Cal notar que el setembre és un mes en que les produccions són molts baixes després dels màxims estivals dels mesos previs. La respiració (R_{mac}) mostra valors màxims entre Juliol i Agost per a *Boca* i entre Abril i Maig a *Mig* i *Cua*.

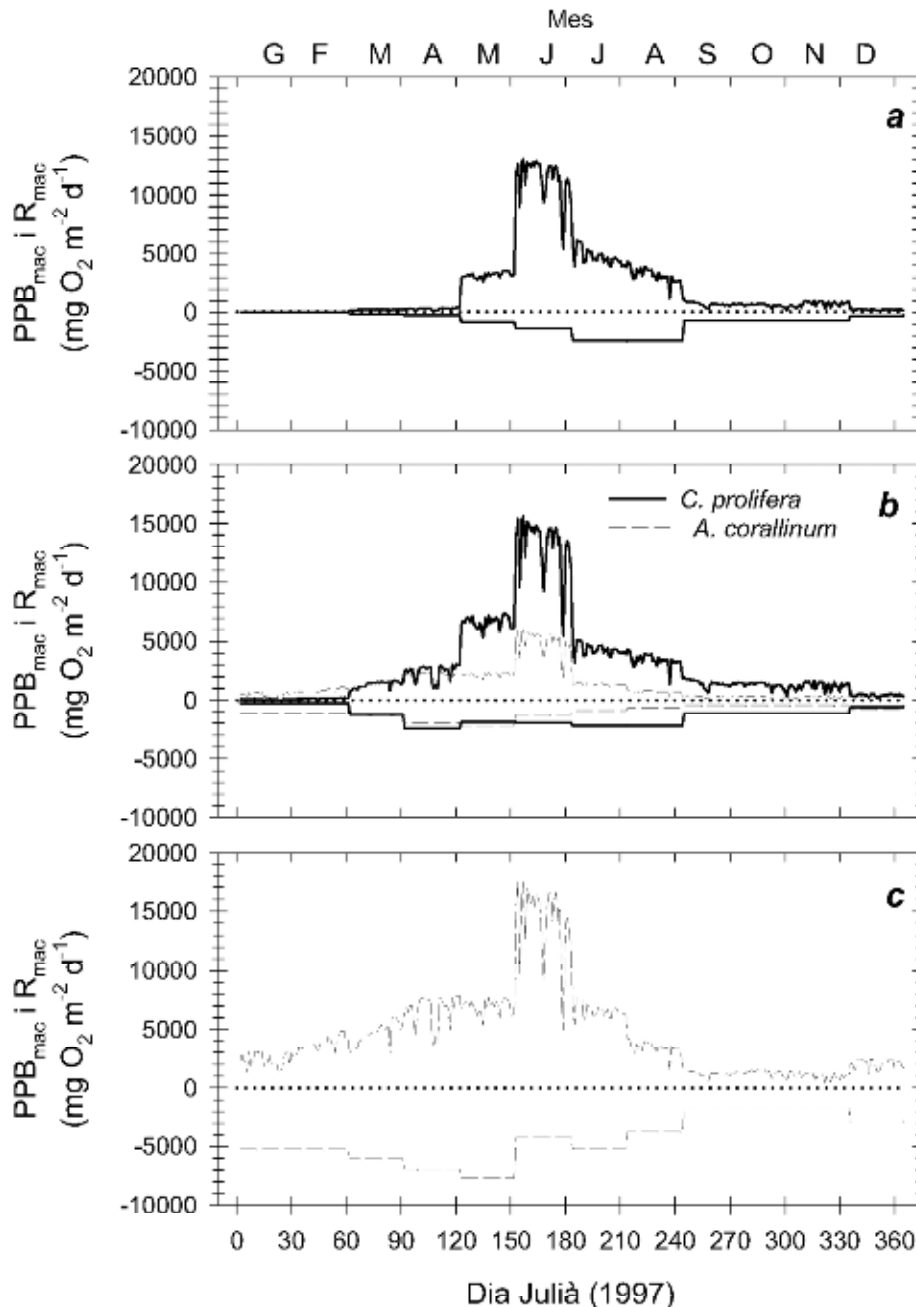


Figura 5.16. Producció Primària Bruta (PPB_{mac}) i Respiració (R_{mac}) de les dues macroalgues bentòniques dominants al llarg de 1997: (a) estació *Boca*, (b) estació *Mig*, (c) estació *Cua*. Les línies de punts a $PPB_{mac}=0$ han estat dibuixades com a referència únicament.

En mitjanes per estacions climatològiques (Taula 5.4) s'observa que a la primavera i l'estiu les macroalgues presenten un balanç fotosintètic diari (Producció Primària Neta) variable però positiu, d'entre aproximadament 400 i 6000 mg O₂ m⁻² d⁻¹, mentre que a la tardor i hivern el balanç passa a estar entre 0 i -2000 mg O₂ m⁻² d⁻¹. El balanç anual pel conjunt de la badia (ponderat per les superfícies de cada compartiment) és de 395 g O₂ m⁻² a⁻¹. En quant a les respiracions diàries de les macroalgues, els seus valors es troben dins el mateix ordre de magnitud que les produccions netes, constatant-se una major respiració per unitat de superfície a l'estació de *Cua* al llarg de l'any i una de menor a *Boca*. La respiració mitjana anual per unitat de superfície de les macroalgues és de 899 g O₂ m⁻² a⁻¹.

Taula 5.4. Balanç d'oxigen de les macroalgues. Calculat amb les estimes de producció primària neta i respiració de les macroalgues, a partir de les mitjanes estacionals sobre els valors representats a la Figura 5.16.

	Hivern ¹	Primavera ¹	Estiu ¹	Tardor ¹	Tot l'any
	(mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)				(g O ₂ m ⁻² a ⁻¹)
Producció Neta					
<i>Boca</i>	2	4014	1170	-93	466
<i>Mig</i>	-368	6409	1568	-135	684
<i>Cua</i>	-1918	2925	373	-609	71
<i>Alfacs</i> ²	-751	4328	1014	-279	395
Respiració					
<i>Boca</i>	59	795	1830	587	299
<i>Mig</i>	1717	3868	2519	1489	878
<i>Cua</i>	5480	6294	3556	2045	1590
<i>Alfacs</i> ²	2360	3525	2609	1336	899

¹ S'ha considerat com a estacions climatològiques als conjunts dels primers tres mesos de l'any per a hivern, del 4 al 6 per a primavera, del 7 al 9 per a estiu, del 10 al 12 per a tardor.

² Els valors per a tot Alfacs provenen de mitjana dels valors de *Boca*, *Mig* i *Cua* ponderats per a les seves superfícies relatives (1.21×10^7 , 0.91×10^7 i 1.08×10^7 m², respectivament).

Respiració del sediment

Les estimes de respiració bentònica "teòrica" (a partir de les biomasses mesurades i les respiracions de les corbes F-I al laboratori, Figura 5.17, eix abscisses) han seguit una bona correlació, en general, amb les mesures de camp de respiració a partir de les campanes d'incubació del bentos ("respiració observada", Figura 5.17, eix ordenades), mostrant significació estadística per a la regressió lineal de les dues variables en més de la meitat dels mostresos (Taula 5.5). El consum d'oxigen del sediment s'ha mantingut entre els mínims de prop de 30 mg O₂ m⁻² h⁻¹ per als mesos d'hivern - primavera i els màxims de prop de 90 mg O₂ m⁻² h⁻¹ d'alguns mesos d'estiu (Taula 5.5), el que suposa de l'ordre de 1500 mg O₂ m⁻² d⁻¹ i 500 g O₂ m⁻² a⁻¹ a escala diària i anual, respectivament.

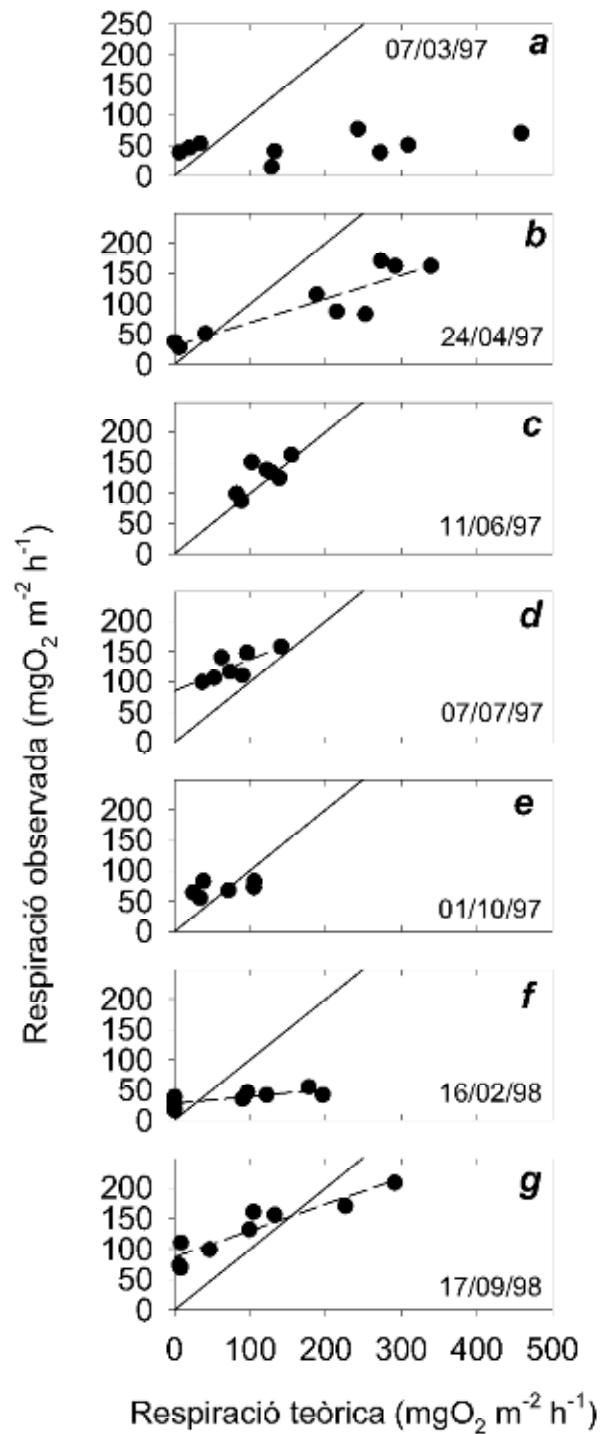


Figura 5.17. Relació entre la respiració teòrica i la respiració observada per diferents mesos del període de mostreig: (a) 07/03/97, (b) 24/04/97, (c) 11/06/97, (d) 07/07/97, (e) 01/10/97, (f) 16/02/98, (g) 17/09/98. La primera prové de multiplicar a la biomassa de les campanes la respiració trobada a laboratori. La respiració observada correspon al consum d'oxigen trobat in situ amb les campanes d'incubació de sediment. Unitats: $\text{mgO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Els punts d'intersecció a l'eix de les ordenades es mostren a la Taula 5.5.

Taula 5.5. Respiració estimada del sediment nu, sense macroalgues. Aquests resultats provenen de regressions lineals de les dades mostrades a la Figura 5.17.

Data	Respiració del sediment estimada (mgO ₂ m ⁻² h ⁻¹)	r ²	n	p
07/03/97	37,7	0,226	9	n.s.
24/04/97	29,8	0,820	9	p<0.05
11/06/97	42,1	0,547	7	n.s.
07/07/97	84,7	0,604	7	p<0.05
01/10/97	61,9	0,242	6	n.s.
16/02/98	27,4	0,594	9	p<0.05
17/09/98	87,1	0,865	9	p<0.05

Balanços del bentos

El balanç d'oxigen del bentos del conjunt de la badia dels Alfacs és negatiu durant la major part de l'any (Taula 5.6). L'estació *Boca* és la que presenta unes menors respiracions, seguida de l'estació *Mig* i amb valors màxims a *Cua*. El balanç net diari només és positiu a primavera, amb valors entre 2×10^3 i 4.2×10^3 mg O₂ m⁻² d⁻¹ (amb 3×10^3 mg O₂ m⁻² d⁻¹ de mitjana ponderada per a tota la badia). La resta de l'any, el balanç bentònic és negatiu, amb valors més negatius durant la tardor i l'hivern. En balanç anual, la producció neta és positiva per l'estació *Boca* i *Mig* (36 i 154 g O₂ m⁻² a⁻¹, respectivament), i negativa tant per a l'estació *Cua* (-360 g O₂ m⁻² a⁻¹) i com per a tota la badia en general (-64 g O₂ m⁻² a⁻¹).

Les simulacions dels balanços bentònics d'oxigen a finals d'estiu indiquen que en absència d'aports hidrodinàmics d'oxigen i depenent de l'escenari de llum i biomassa considerat (Taula 5.7), l'anòxia a l'estació *Cua* es pot assolir entre uns pocs dies i les quatre setmanes, o bé no assolir-se (Figura 5.18). Així, en absència de macroalgues a l'estació *Cua*, el metabolisme net bentònic d'oxigen estimat per a Setembre es de -2090 mg O₂ m⁻² d⁻¹. En situació d'altres irradiàncies incidents (escenari I1) les macroalgues contribueixen a fer menys negatiu el balanç global del bentos, de per si deficitari d'oxigen, arribant pràcticament a satisfer la demanda d'oxigen del sediment quan la seva biomassa arriba al voltant dels 600 g PS m⁻². El següent nivell d'irradiància (I2) permet una certa reducció del balanç negatiu d'oxigen per a valors mitjans de biomassa macroalgal però el torna a fer més negatiu un altre cop entre 300 i 600 g PS m⁻². Les darreres tres condicions de llum (I3, I4 i I5) mostren un decreixement continu en el metabolisme net diari d'oxigen a mesura que els valors de biomassa de les mates macroalgals augmenten, assolint un balanç negatiu màxim per a I5 a 600 g PS m⁻² de -5240 mg O₂ m⁻² d⁻¹.

Taula 5.6. Balanç global d'oxigen del bentos, incloent la contribució de les macroalgues i del sediment. Els valors de producció neta bentònica provenen de les estimes de producció primària neta per a les macroalgues (mitjanes estacionals a partir dels valors de la Figura 5.16) més les estimes de la respiració del sediment nu de cada estació climatològica a partir dels valors de la Taula 5.5.

	Hivern ¹	Primavera ¹	Estiu ¹	Tardor ¹	Tot l'any
	(mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹)				(g O ₂ m ⁻² a ⁻¹)
Producció Neta					
<i>Boca</i>	-635	3038	-912	-1101	36
<i>Mig</i>	-994	4228	-470	-1076	154
<i>Cua</i>	-2555	1949	-1708	-1617	-360
<i>Alfacs</i> ²	-1385	3009	-1055	-1268	-64
Respiració					
<i>Boca</i>	696	1771	3912	1596	730
<i>Mig</i>	1921	4413	4454	2242	1192
<i>Cua</i>	6117	7270	5637	3054	2020
<i>Alfacs</i> ²	2874	4378	4648	2272	1297

¹ S'ha considerat com a estacions climatològiques als conjunts dels primers tres mesos de l'any per a hivern, del 4 al 6 per a primavera, del 7 al 9 per a estiu, del 10 al 12 per a tardor.

² Els valors per a tot Alfacs provenen de mitjana dels valors de Boca, Mig i Cua ponderats per a les seves superfícies relatives (1.21×10^7 , 0.91×10^7 i 1.08×10^7 m², respectivament).

Taula 5.7. Reducció total de la irradiància (%) en funció de la biomassa macroalgal (g PS m⁻²) per a cada escenari lumínic. Aquesta reducció s'ha calculat amb el quocient entre la irradiància PAR sota les macroalgues i la irradiància PAR aèria sense núvols. Els codis I1 a I5 dels escenaris d'irradiància són els explicats en el text i en la Figura 5.18.

Escenari lumínic	Reducció total de la irradiància (%)				
	B=1	B=10	B=100	B=300	B=600
<i>I1</i>	16.2 %	15.8 %	12.5 %	7.4 %	3.4 %
<i>I2</i>	8.1 %	7.9 %	6.2 %	3.7 %	1.7 %
<i>I3</i>	5.3 %	5.2 %	4.1 %	2.4 %	1.1 %
<i>I4</i>	3.1 %	3.0 %	2.4 %	1.4 %	0.7 %
<i>I5</i>	1.6 %	1.5 %	1.2 %	0.7 %	0.3 %

Amb aquestes xifres, pot estimar-se que en la situació més dolenta (irradiància I5, biomassa màxima) i partint d'una situació de normòxia, s'arribaria al nivell d'anòxia en un termini de 3 dies. D'altra banda, en una situació d'irradiància alta (I1) i també alta biomassa algal (600 g PS m⁻²), la situació de normòxia es mantindria indefinidament.

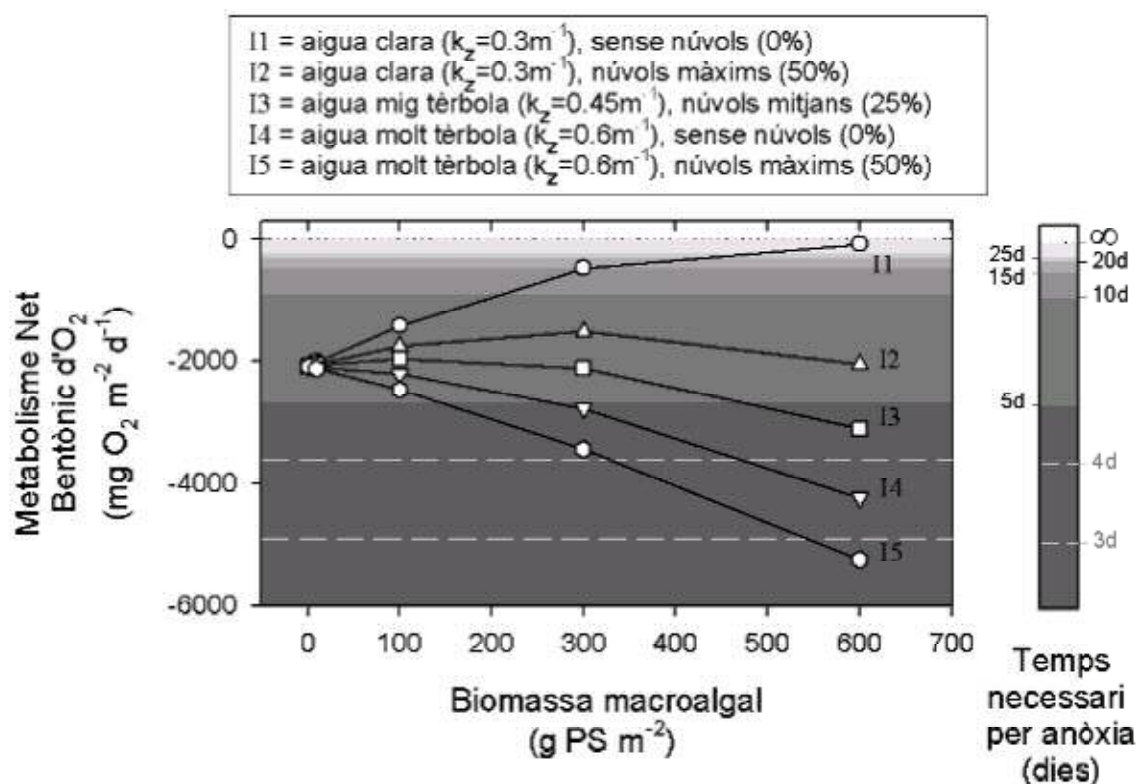


Figura 5.18. Contribució de les macroalgues al balanç net diari bentònic i risc d'anòxia per un dia-típic de setembre, en funció de la nuvolositat i de la terbolesa de l'aigua a l'estació de *Cua*. Els codis dels nivells d'irradiància incident corresponen a: I1 = aigua clara ($k_z = 0.3 \text{ m}^{-1}$) + sense núvols (0 %); I2 = aigua clara ($k_z = 0.3 \text{ m}^{-1}$) + màxima nuvolositat (50 %); I3 = aigua mig tèrbola ($k_z = 0.45 \text{ m}^{-1}$) + nuvolositat mitjana (25 %); I4 = aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 \text{ m}^{-1}$) + sense núvols (0 %); I5 = aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 \text{ m}^{-1}$) + nuvolositat màxima (50 %). Les intensitats de gris de fons indiquen el nombre de dies que s'ha de mantenir la mateixa situació per que l'aigua es torni anòxica (veure text per més detalls).

5.2. Discussió

Paràmetres fotosintètics

Els paràmetres fotosintètics P_m^{mac} , I_{sat} i I_c solen mostrar valors més baixos cap a l'hivern, en la línia de l'observat per King i Schramm (1976) en la majoria de les 22 espècies de macroalgues analitzades a la badia Kiel d'Alemanya (plana 319, Annex B), i valors més alts a primavera-estiu. Els valors més baixos de P_m^{mac} podrien ser un estalvi per a la planta (i en part, conseqüència de la menor temperatura). Pel contrari, una menor I_{sat} (i I_c) permet un ús més eficient de la llum a baixes irradiancies, i/o augmentar el nombre d'hores en que l'alga té producció neta positiva. En el cas de la I_c , observem aquest descens a *Alsidium corallinum*, però no sembla donar-se a *Caulerpa prolifera* (Figura 5.12c), i es desconeix si té alguna relació amb que *C. prolifera* no sobrevisqui hiverns massa freds (veure primera part del 0).

El balanç de carboni (i d'oxigen) de *C. prolifera* sembla controlat per la irradiancia i la temperatura. L'òptim de fotosíntesi de *C. prolifera* es troba a 5 m de fondària (Häder *et al.* 1997), investigat a prop de Corint (Grècia) on l'aigua és molt més transparent que a la badia dels Alfacs. Aquesta és la mateixa fondària que la de la cubeta de la badia dels Alfacs, però la major transparència de l'aigua a les aigües de Corint permet que hi arribi prop del 50% de la irradiancia incident en superfície, mentre que, a les aigües de la badia dels Alfacs, arriba només entre el 2 i el 16 % (Figura 5.14). Es podria pensar, doncs, que a major irradiancia, *C. prolifera* hauria de mostrar una major fotosíntesi. Això va en la mateixa línia que la constatació de que les poblacions de *C. prolifera* de la badia dels Alfacs són relativament estables des de la darrera dècada (anys 90) únicament a les plataformes someres, però no al fons de la badia (Mascaró *et al.* 2006). A nivell estacional, per altra banda, *C. prolifera* no mostra els màxims de fotosíntesi (P_m^{mac}) en el moment de l'any de major irradiancia (primavera), sinó a l'estiu (Figura 5.12a), potser a causa de la millor combinació de valors òptims de temperatura i irradiancia.

Els percentatges de llum que arriben a les macroalgues *C. prolifera* i *A. corallinum* (2-16 % respecte la irradiancia superficial) són baixos, però lluny encara de ser per sota dels llindars del 0.5 % per a la supervivència d'algues de tal·lus gruixut (de moltes capes de cèl·lules), 0.1 % per a la d'algues de tal·lus prim (poques o una capa de cèl·lules) i 0.01 % per a la d'algues vermelles incrustants de fondària (Markager i Sand-Jensen 1994). Ara bé, increments de turbulència de l'aigua podrien, en teoria, fer més difícil la seva supervivència.

En comparar els valors absoluts de P_m^{mac} amb els d'algues d'altres estuaris, es constata que si bé *Caulerpa prolifera* té produccions relativament altes (o bé de l'ordre d'altres cloròfits afins), *Alsidium corallinum* té produccions de l'ordre de magnitud d'altres macroalgues en general, que a l'hora són relativament baixes respecte altres rodòfits. Ferreira i Ramos (1989) van estimar la producció neta (PN) i bruta (PB) de les macroalgues presents a l'estuari del riu Teixo exposades a llum saturant. Considerant una relació molar d'oxigen:carboni de 1:1, trobem que les seves PN i PB respectivament

van ser de 1.1 i 1.3 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ per *Fucus vesiculosus*, 2.7 i 3.7 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ per *Ulva lactuca* i 3.2 i 4 mg O₂ g PS⁻¹ h⁻¹ per *Gracilaria verrucosa*. Aquests valors es troben fins a 3 vegades per sota que els màxims observats de P_m^{net} (de producció neta) per a *C. prolifera*, i en el mateix rang que les trobades per a *A. corallinum* a la badia dels Alfacs (Figura 5.12a). Però si fem servir les seves produccions màximes respecte les seves respiracions en la comparació (PN/R), *C. prolifera* té una producció respecte respiració de 6.1, relativament propera a la mitjana de valors trobats a la literatura (Buesa 1977) per a la mateixa espècie (6.0) o taxa afins (6.3 de mitjana per a 39 espècies de cloròfits); en canvi, *A. corallinum* té una PN/R més aviat baixa (4.5 i 1.7 de mitjana i mínima absoluta, respectivament) en comparació amb el valor de 6.4 de mitjana de les 23 espècies de rodòfits obtinguda per Buesa en aigües 10 ° C més càlides. Això podria indicar que *A. corallinum* no es troba en condicions òptimes a la badia dels d'Alfacs. I això tindrà implicacions en la poca contribució d'*A. corallinum* a les entrades netes d'oxigen en l'estació de *Cua*, on es presenta com a única espècie colonitzadora del sediment, i on més s'han detectat els fenòmens hipòxics a la badia.

Balanços globals de les algues

Es constata que els màxims anuals de producció neta de les macroalgues no coincideixen amb els seus màxims anuals de respiració, sinó que els primers precedeixen un mes als segons en *C. prolifera* (Figura 5.16a, b) i al contrari en *A. corallinum* (Figura 5.16b, c). Aquest desacoblament temporal dels processos productius i de consum de les macroalgues podria ser un fet potencialment important per la dinàmica d'oxigen (Borum 1996), malgrat no sembla tenir en aquest cas efectes importants. En canvi, el que sembla ser rellevant en el cas de la contribució macroalgal al balanç d'oxigen dissolt de la badia dels Alfacs és que en aquesta predominin els termes de consum respecte els de producció, tal i com esdevé a tardor i hivern (Taula 5.4), però no a la primavera ni tampoc a l'estiu (mitjana de juliol, agost i setembre). La causa decisiva per a què entre finals de primavera (1a quinzena de juny) i finals d'estiu (1a quinzena de setembre) la producció neta diària de les algues disminueixi dràsticament (Figura 5.16), sembla trobar-se en el coeficient d'extinció de la llum (Figura 5.13), que redueix la irradiància de forma notable, i per sota de la I_{sat} de les macroalgues (H_{sat} decreixent) a mesura que avança l'estiu (Figura 5.15). No es pot atribuir aquest efecte a un augment de l'autoombra, per que les biomasses disminueixen en aquest període concret (Figura 5.6), ni tampoc a la disminució de la irradiància aèria, que no es comença a fer notòria fins mesos més tard (Figura 2.5).

Val a dir que el coeficient d'extinció de la llum per la biomassa algal (K_b) és un factor molt important pel balanç. El fet d'haver emprat un coeficient K_b únic per a totes els casos podria introduir un cert grau d'incertesa, tenint en compte la variabilitat de la composició i estructura de la volta algal. Si hi ha només *Caulerpa* i en poca quantitat, llavors el procés d'autoombra és poc important (estació *Boca*, i *Cua*; Figura 5.6). A més, els resultats de K_b obtinguts a voltes foliars de fanerògames marines com *Posidonia oceanica* (entre 0.0031 i 0.0073 m² g⁻¹ PS; Pérez, dades no publicades), amb morfologia de fulles similar a la dels fronds de *C. prolifera*, significaven valors força similars als mesurats per *A. corallinum* (0.0027 m² g⁻¹ PS), pel que permeten emprar aquest coeficient en mates on predomina *C. prolifera* (estació *Boca*, i en part, *Mig*). I en zones amb abundància d'*A. corallinum*, amb biomasses

entre similars a les de *C. prolifera* (estació *Mig*), o molt superiors (arribant a ser les única macroalga present a l'estació *Cua*), aquest coeficient K_b és de per si l'adient, per que *A. corallinum* no forma una estructura clara de la volta, sinó que més aviat sembla que els filaments poden estar amuntegats els uns sobre els altres.

Respiració del sediment

Els nostres valors de respiració del sediment són de l'ordre del doble que els obtinguts per Vidal *et al.* (1992) sense agitació, i del mateix ordre que els resultats posteriors amb agitació per motor elèctric, per a estiu i hivern, de Vidal *et al.* (1997), mentres que en primavera els valors van ser similars als mostrats aquí per al mateix mes. Sembla lògic que el sediment rebi ara una entrada addicional de matèria orgànica procedent de la mata algal que té a sobre, generant una major demanda d'oxigen: entre 11 mg O₂ m⁻² h⁻¹ (Vidal *et al.* 1992) i 51 mg O₂ m⁻² h⁻¹ (Vidal *et al.* 1997) per a 1987, i ara entre 60 i 90 mg O₂ m⁻² h⁻¹ (Taula 5.5) per la mateixa època.

La respiració actual del sediment de la badia dels Alfacs, sense comptar macroalgues, és relativament elevada (149 gC m⁻² a⁻¹, a partir de les taules Taula 5.6 i Taula 5.4), superior a 10 de les 15 referències citades a Nixon (1981), i també atenent a la poca alçada de la columna d'aigua de la badia, en la línia del que s'observa en badies de menys de 5 m de fondària (Kemp *et al.* 1992). Els resultats obtinguts (Taula 5.5) es troben per sobre del rang de consums bentònics descrits per a sistemes marcadament eutròfics com per exemple la badia de Tolo (Hong Kong, Xina; plana 329; Hodgkiss i Yim 1995, Chau i Jin 1998, Lee i Arega 1999), i que es troben entre 18 i 48 mg O₂ m⁻² h⁻¹ (Hu *et al.* 2001). I són molt superiors que els valors mitjans descrits per al Kattegatt SE i badia de Laholm (Nord d'Europa; plana 319), entre 4.9 a 14.2 mg O₂ m⁻² h⁻¹ (Rydberg *et al.* 1990). De totes formes, no arriben als valors extrems trobats a la llacuna costanera de Certes de la Badia d'Arcachon (costa occidental de França), on s'han descrit demandes del sediment de 352 mg O₂ m⁻² h⁻¹ en zones someres properes a una antiga granja de peixos i amb poca renovació de l'aigua de mar (Viarelli *et al.* 1996). Val a dir, al marge de la discussió principal que ens porta aquest capítol, que l'aqüicultura dels musclos desenvolupada a la badia dels Alfacs fa augmentar el consum d'oxigen del sediment, però de forma localitzada, i es creu que té poc pes respecte el total del consum bentònic de la badia, a causa de la poca superfície relativa que ocupen (s'analitzarà millor aquest aspecte en el capítol següent). A més, es creu que la seva presència pot contribuir a incrementar el consum bentònic en poques desenes de mgO₂ m⁻² h⁻¹, a la llum d'experiments de camp fets en badies similars (Golf de Fos, costa sud de França en la desembocadura del Roine, Plante Cuny *et al.* 1993).

Balanços globals del sistema i el paper de les algues

La mitjana de producció neta bentònica d'estiu a la badia dels Alfacs és -1055 mg O₂ m⁻² d⁻¹, i la seva mitjana anual és -64 mg O₂ m⁻² d⁻¹ (Taula 5.6). Aquests valors es poden comparar amb un sistema concret de fondària i clima comparable, com és la badia de Tomales (Annex B, plana 324), que té mitjanes estivals i anuals de producció neta bentònica de -544 i -288 mg O₂ m⁻² d⁻¹ (Dollar *et al.* 1991). La respiració estival dels Alfacs és molt superior a la de Tomales, però també ho és la producció primaveral de les macroalgues, amb el que la badia dels Alfacs es troba més equilibrada en balanç

net anual que la de Tomales. Es dedueix que la presència de les macroalgues influeix tant a nivell d'augmentar la producció fotosintètica, per un costat, respecte altres sistemes comparables, però també fa augmentar la respiració bentònica.

Per tenir un ventall més ampli de mesures de referència, ni que sigui per als seus ordres de magnitud, es pot recórrer als resultats de Dollar *et al.* (1991), que van mostrar que la producció neta bentònica de 19 sistemes costaners es trobava entre 0 i $-2600 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, amb una mediana de $-736 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (a partir de dades de van Es 1982 i Fisher *et al.* 1982). Aquests valors no provenen de mesures repetides al llarg de l'any en tots els casos, sinó que més aviat la majoria de dades provenen de l'estiu, i per tant, s'ha d'interpretar amb cautela la seva comparació amb les mitjanes anuals descrites prèviament per a la badia dels Alfacs i la de Tomales. En tot cas, aquestes dues badies es trobarien dins el rang observat en els altres llocs, que mostra que les comunitats bentòniques dels sistemes costaners solen ser marcadament heterotròfiques, tot i les grans poblacions i comunitats algals que hi poden habitar-les.

Encara que el balanç producció / respiració de les macroalgues hagi de ser en general positiu (les algues van colonitzar la badia; Figura 5.4), pot ser localment negatiu en determinats moments o llocs (Taula 5.4). Això es dona especialment en passar de disposar de molta llum (creixen les algues, la autoombra es supera a base de molta llum) a disposar de poca llum (la biomassa acumulada passa a no rebre prou llum i a convertir-se, transitòriament, en consumidora neta). Aquesta situació es sol donar a la badia dels Alfacs entre finals d'estiu i principis de tardor. Per exemple, a finals de setembre de 1997 es van presentar els valors màxims de la constant d'extinció de la llum a la columna d'aigua (K_z), al voltant de 0.6 m^{-1} (Figura 2.4), i la biomassa mitjana trobada en *Cua* en aquest mes (poc més de 200 g PS m^{-2} , Figura 5.6b) va provocar prou autoombra com per deixar gran part de la mata d'algues per sota de la seva irradiància de compensació (Figura 5.15c). En aquest cas, doncs, la presència de macroalgues fa que augmenti el risc d'aparició d'anòxies (Figura 5.18). Si, a més, aquests moments crítics coincideixen amb episodis de forta nuvolositat, la balança es pot decantar encara més cap als termes de consum que cap als de producció (veure per exemple l'efecte de passar de l'escenari I4 a I5). Això no s'ha observat a la badia dels Alfacs, si bé Peckol i Rivers (1995) van enregistrar a la badia de Waquoit (Massachusetts, EUA) un període anòxic breu després de dos dies ennuvolats a finals de juliol. El seu cas és el d'una badia més somera (1 i 3 m de fondària mitjana i màxima, respectivament), que als estius pateix unes acumulacions més fortes (de 0.3 fins a més d'1 m d'alçada) de dues espècies de macroalgues: *Cladophora vagabunda* (L.) van den Hoek i *Gracilaria tikvahiae* McLachlan.

Per altra banda, Sundbäck *et al.* (1990) van trobar que només l'addició d'una gran quantitat de macroalgues sobre un sediment inicialment amb un balanç d'oxigen positiu (1.8 kg PF m^{-2} , valors trobats a finals d'estiu a platges de la costa Oest de Suècia) provocaven prou reducció de la llum incident (90%) com per convertir en negatiu el balanç d'oxigen bentònic. Per valors intermedis de biomassa macroalgal afegida en el seu experiment (0.9 kg PF m^{-2} , 70% de reducció de la llum), el

balanç seguia essent positiu des de l'inici de l'experiment, i ho atribuïen a la inferior autoombra d'aquest segon acúmulo macroalgal que permetia prou activitat tant del microfitobentos, com de les macroalgues acumulades i les seves microalgues epífites. En la badia dels Alfacs, l'activitat fotosintètica del microfitobentos (en l'època en que no abundaven les macroalgues) era poc important respecte l'elevat consum del sediment (181 respecte $1440 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) com per mantenir un balanç d'oxigen positiu per ell sol (Camp *et al.* 1991). En conseqüència, és normal que a partir d'acúmulos petits de macroalgues (100 g PS m^{-2}), combinats amb la reducció de la irradiància pròpia d'algunes setmanes de finals d'estiu ($K_2 = 0.6 \text{ m}^{-1}$, Figura 2.4), ja es produeixi un balanç bentònic global negatiu (Figura 5.18).

En resum, es constata que les macroalgues juguen un doble paper: augmenten en general la producció neta de la badia en balanç anual, per un costat, però per altra banda també fan augmentar el risc de davallades fortes d'oxigen dissolt de la columna d'aigua en situacions ja de per si conflictives, com les de finals d'estiu a la badia dels Alfacs. Queda pendent comparar la influència de les macroalgues en la dinàmica d'oxigen dissolt de la badia, respecte els altres elements importants de l'ecosistema, tant biòtics com abiòtics, esmentats en capítols previs. Aquesta qüestió és la que s'aborda en el següent capítol, a mode d'anàlisi final conjunta de tots els resultats.

Bibliografia

- Alcoverro, T., *et al.*, 1998. Seasonal and age-dependent variability of *Posidonia oceanica* (L.) Delile photosynthetic parameters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 230 1-13.
- Amico, V., *et al.*, 1978. *Tetrahedron Lett*, 3593.
- Astill, H. i Lavery, P. S., 2001. The dynamics of unattached benthic macroalgal accumulations in the Swan-Canning Estuary. *Hydrological Processes*, 15 (13): 2387-2399.
- Augier, H. i Robert, P., 1981. Sur la presence de *Caulerpa prolifera* (Forsskal) Lamouroux (Algue Bryopsidophyceae) dans les iles d'Hyères et sur sa signification bioclimatique et ecologique. *Trav. sci. Parc nation. Port-Cros*, 7 119-128.
- Barceló, M. C. i Seoane-Camba, J. A., 1989. Variació fenològica d'*Alsidium corallinum* C. Agardh (Rhodomelaceae: Rhodophyta) a les costes de la Plana i Alacant. *Butll Inst Cat Hist Nat*, 57 35-39.
- Bates, S. S., *et al.*, 1989. Pennate diatom *Nitzschia pungens* as the primary source of domoic acid, a toxin in shellfish from eastern Prince Edward Island, Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, 46 (7): 1203-1215.
- Beer, S. i Eshel, A., 1983. Photosynthesis of *Ulva* sp. II. Utilization of CO₂ and HCO₃⁻ when submerged. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 70 99-106.
- Bendoricchio, G., *et al.*, 1994. A trophic model for *Ulva rigida* in the Lagoon of Venice. *Ecol. Modelling*, (75/76): 485-496.
- Børgesen, F., 1925. "I. Chlorophyceae", a *Marine algae from the Canary Islands, especially from Tenerife and Gran Canaria*, 3, 112. Det Kgl. Danske Videnskabernes Selskab, Kobenhavn.
- Borum, J., 1996. "Shallow waters and Land/Sea Boundaries", a *Eutrophication in coastal Marine Ecosystems*, 52, 179-203. American Geophysical Union, Washington DC.
- Brunelli, M., *et al.*, 1998. Caulerpenyne, a seaweed biotoxin, provokes the inhibition of the Na⁺/K⁺ electrogenic pump in neurons. *Society for Neuroscience Abstracts*, 24 (1-2): 231..
- Buesa, R. J., 1977. Photosynthesis and respiration of some tropical marine plants. *Aquatic Botany*, 3 203-216.

- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Camp, J., *et al.*, 1991. Production-consumption budget in an estuarine bay: how anoxia is prevented in a forced system. *Oecologia aquatica*, 10 145-152.
- Cebrian, J. i Duarte, C. M., 1995. Plant growth-rate dependence of detrital carbon storage in ecosystems. *Science*, 268 (5217): 1606-1608.
- Charpy-Robaud, C. i Sournia, A., 1990. The comparative estimation of phytoplanktonic, microphytobenthic and macrophytobenthic primary production in the oceans. *Mar. Microb. Food Webs*, 4 31-57.
- Chau, K. W. i Jin, H., 1998. Eutrophication model for a coastal bay in Hong Kong. *Journal of Environmental Engineering*, 124 (7): 628-638.
- Daigo, K., 1959. Constituents of *Chondria armata*. Part I: Detection of antihelminthic constituents. *J. Pharm. Soc. Japan-Yakugaku Zasshi*, 79 350-353.
- De Casabianca, M. L. i Posada, F., 1998. Effect of Environmental Parameters on the Growth of *Ulva rigida* (Thau Lagoon, France). *Botanica Marina*, 41 157-165.
- Dennison, W. C. i Alberte, R. S., 1985. Role of daily light period in the depth distribution of *Zostera marina* (eelgrass). *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 25 51-61.
- Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.
- Dollar, S. J., *et al.*, 1991. Annual cycle of benthic nutrient fluxes in Tomales Bay, California, and contribution of the benthos to total ecosystem metabolism. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 79 115-125.
- Duarte, C. M., 1995. Submerged aquatic vegetation in relation to different nutrient regimes. *Ophelia*, 41 87-112.
- Duarte, P. i Ferreira, J. G., 1995. Seasonal adaptation and short-term metabolic responses of *Gelidium sesquipedale* to varying light and temperature. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 121 (1-3): 289-300.

- Ferreira, J. G. i Ramos, L., 1989. A model for the estimation of annual production rates of macrophyte algae. *Aquatic Botany*, 33 53-70.
- Fisher, T. R., *et al.*, 1982. Sediment nutrient regeneration in three North Carolina estuaries. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 14 101-116.
- Fletcher, R. L., 1996. "The occurrence of "Green Tides" - a Review", a *Marine Benthic Vegetation*, 123, 7-43. Springer, Berlin.
- Francour, P., *et al.*, 1994. Are the Mediterranean waters becoming warmer? Information from biological indicators. *Mar. Pollut. Bull.*, 28 (9): 523-526.
- Gao, K., 1990. Seasonal variation of the photosynthetic capacity in *Sargassum horneri*. *Jpn. J. Phycol.*, 38 25-33.
- Gavagnin, M., *et al.*, 1994. Defensive relationships between *Caulerpa prolifera* and its shelled sacoglossan predators. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 175 (2): 197-210.
- Gerard, V. A., 1986. Photosynthetic characteristics of giant kelp (*Macrocystis pyrifera*) determined *in-situ*. *Mar. Biol.*, 90 473-482.
- Granado, I. i Caballero, P., 2001. Feeding rates of *Littorina striata* and *Osilinus atratus* in relation to nutritional quality and chemical defenses of seaweeds. *Marine Biology*, 138 (6): 1213-1224,.
- Guiry, M. D. i Dhonncha, E. N., 2001. AlgaeBase:
- Häder, D. P., *et al.*, 1997. Photosynthesis of the mediterranean green alga *Caulerpa prolifera* measured in the field under solar irradiation. *J. Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 37 (1-2): 66-73.
- Hatcher, B. G., 1977. An apparatus for measuring photosynthesis and respiration of intact large marine algae and comparison of results with those from experiments with tissue segments. *Mar. Biol.*, 43 381-385.
- Higa, T. i Kuniyoshi, M., 2000. Toxins associated with medicinal and edible seaweeds. *Journal of Toxicology-Toxin Reviews*, 19 (2): 119-137.
- Hillman, K., *et al.*, 1995. The distribution, biomass and primary production of the seagrass *Halophila ovalis* in the Swan-Canning estuary, Western Australia. *Aquatic Botany*, 51 1-54.

-
- Hodgkiss, I. J. i Yim, W. W. S., 1995. "A case study of Tolo Harbour, Hong Kong", a *Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons.*, 41-57.
- Hu, W. F., *et al.*, 2001. Nutrient release and sediment oxygen demand in a eutrophic land-locked embayment in Hong Kong. *Environment International*, 26 (5-6): 369-375.
- Impellizzeri, G., *et al.*, 1975. Amino acids and low-molecular-weight carbohydrates of some marine algae. *Phytochemistry*, 14 1549-1557.
- Invers, O. i De Pedro, X., 2001. Anàlisi de riscos d'anòxies i toxicitat de macroalgues a la badia dels Alfacs:
- Iverson, F. i Truelove, J., 1994. Toxicology and Seafood Toxins: Domoic Acid. *Natural Toxins*, 2 334-339.
- Kamermans, P., 1996. "Growth and loss processes in bloom-forming macroalgae (*Ulva* sp.)", a *Contribution for EUMAC Synthesis Report*, 371-382.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1983. The decline of submerged vascular plants in upper Chesapeake Bay: summary of results concerning possible causes. *Mar. Technol. Soc. J.*, 17 78-89.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1992. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake bay: Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 85 (1-2): 137-152.
- King, R. J. i Schramm, W., 1976. Photosynthetic rates of benthic marine algae in relation to light intensity and seasonal variations. *Marine Biology*, 37 215-222.
- Kirk, J. T. O., 1983. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems:
- Koehl, M. A. R. i Alberte, R. S., 1988. Flow, flapping, and photosynthesis of *Nereocystis luetkeana*: a functional comparison of undulate and flat blade morphologies. *Mar. Biol.*, 99 435-444.
- Lee, J. H. W. i Arega, F., 1999. Eutrophication Dynamics of Tolo Harbour, Hong Kong. *Marine Pollution Bulletin*, 39 (1-12): 187-192.
- Levitt, G. J. i Bolton, J. J., 1990. Seasonal primary productivity of understorey Rhodophyta in an upwelling system. *J. Phycol.*, 26 214-220.

- Littler, M. M., 1980. Morphological form and photosynthetic performances of marine macroalgae: test of functional/form hypothesis. *Botanica Marina*, 22 161-165.
- Littler, M. M. i Arnold, K. E., 1980. Sources of variability in macroalgal primary productivity: sampling and interpretative problems. *Aquatic Botany*, 8 141-156.
- Littler, M. M. i Arnold, K. E., 1982. Primary productivity of marine macroalgal functional-form groups from southwestern North America. *J. Phycol.*, 18 307-311.
- Littler, M. M. i Littler, D. S., 1980. The evolution of thallus form and survival strategies in benthic marine macroalgae: field and laboratory tests of a functional form model. *American Naturalist*, 116 25-44.
- Malan, D. E. i McLachlan, A., 1991. In situ benthic oxygen fluxes in a nearshore coastal marine system: a new approach to quantify the effect of wave action. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 73 69-81.
- Markager, S. i Sand-Jensen, K., 1994. "The physiology and ecology of light-growth relationship in macroalgae", a *Progress in Phycological Research*, 10, 209-298.
- Martínez, A., 1990. Estudio ecológico de las algas efemerofíceas: papel en los flujos de materia y energía en un sistema estuárico (Bahía de los Alfaques, Delta del Ebro, España). Ph. D. Thesis, 166 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Martins, I., *et al.*, 1997. Modelling the effects of green macroalgae blooms on the population dynamics of *Cyathura carinata* (Crustacea: Isopoda) in an eutrophied estuary. *Ecological Modelling*, 102 33-53.
- Mascaró, O., *et al.*, 2006. Is eutrophication behind changes in benthic vegetation in a mediterranean coastal bay? *Research and Management of Eutrophication in Coastal Ecosystems*:
- Meinesz, A., 1979. Contribution à l'étude de *Caulerpa prolifera* (Forsskal) Lamouroux (Chlorophycée-Caulerpale). III - Biomasse et productivité primaire dans une station des côtes continentales françaises de la Méditerranée. *Botanica Marina*, XXII 123-127.
- Meinesz, A., 1980. Contribution à l'étude des Caulerpales (Chlorophytes). Avec une mention particulière aux espèces de la Méditerranée occidentale. 262 pp., Univ. Niza.
- Ménesguen, A., 1992. Modelling coastal eutrophication: the case of French *Ulva* mass blooms. *Marine coastal eutrophication. Proc. Int. Conf.*: 979-992.

- Monteith, J. L., 1973. Principles of environmental physics, 34:
- Morand, P. i Briand, X., 1996. Excessive growth of macroalgae: a symptom of environmental disturbance. *Botanica marina*, 39 491-516.
- Murase, N., *et al.*, 1989. Photosynthetic characteristics of several species of Rhodophyceae from different depths in the coastal area of Shima Peninsula, central Japan. *Jpn. J. Phycol. (Sorui)*, 37 213-220.
- Neira, C. i Rackemann, M., 1996. Black spots produced by buried macroalga in intertidal sandy sediments of the Wadden Sea: Effects on the meiobenthos. *Journal of Sea Research*, 36 (3-4): 153-170.
- Nienhuis, P. H., 1984. Temporal and spatial patterns of eelgrass (*Zostera marina* L.) in a former estuary in The Netherlands, dominated by human activities. *MTS Journal*, 17 (2): 69-77.
- Nijjar-Mohinder, S. i Nijjar-Satnam, S., 2000. Domoic acid-induced neurodegeneration resulting in memory loss is mediated by Ca²⁺ overload and inhibition of Ca²⁺ + calmodulin-stimulated adenylate cyclase in rat brain (review). *International Journal of Molecular Medicine*, 6 (4): 377-389.
- Nixon, S. W., 1981. "Remineralization and nutrient cycling in coastal marine ecosystems", a *Estuaries and Nutrients*, 111-138. Humana Press, Clifton, NJ.
- Parent-Massin, D., *et al.*, 1996. Evaluation of the toxicological risk to humans of caulerpenyne using human hematopoietic progenitors, melanocytes, and keratinocytes in culture. *J. Toxicol. Environ. Health*, 47 (1): 47-59.
- Paul, V. J. i Fenical, W., 1987. "Natural Products Chemistry and Chemical Defense in Tropical Marine Algae of the Phylum Chlorophyta", a *Bioorganic Marine Chemistry*, 1, 1-29. Springer-Verlag, Berlin.
- Peckol, P. i Rivers, J. S., 1995. Physiological responses of the opportunistic macroalgae *Cladophora vagabunda* (L.) van den Hoek and *Gracilaria tikvahiae* (McLachlan) to environmental disturbances associated with eutrophication. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 190 1-16.
- Pérez, M. i Camp, J., 1986. Distribución espacial y biomasa de las fanerógamas marinas de las bahías del delta del Ebro. *Inv. Pesq.*, 50 (4): 519-530.

- Pérez, M., *et al.*, in prep. Changes in benthic vegetation in a Mediterranean estuarine bay (Alfacs Bay, Spain).
- Pérez, M. i Romero, J., 1992. Photosynthetic response to light and temperature of the seagrass *Cymodocea nodosa* and the prediction of its seasonality. *Aquat. Bot.*, 43 51-62.
- Pérez-Ruzafa, A., *et al.*, 1989. "Distribution and biomass of the macrophyte beds in a hypersaline coastal lagoon (the Mar Menor, SE Spain), and its recent evolution following major environmental changes", a *International Workshop on Posidonia Beds*, 2, 49-62. Gis Posidonie, France.
- Plante Cuny, M. R., *et al.*, 1993. Experimental field study of the effects of crude oil, drill cuttings and natural biodeposits on microphyto- and macrozoobenthic communities in a Mediterranean area. *Mar. Biol.*, 117 (2): 355-366.
- Quammen, M. L. i Onuf, C. P., 1993. Laguna Madre: seagrass changes continue decades after salinity reduction. *Estuaries*, 16 (2): 302-310.
- Romero, J., 2004. Posidònia: els prats del fons del mar. *Col·lecció Norai*, 9: 159.
- Romero, J., *et al.*, 1996. "The Spanish Mediterranean Coast", a *Marine Benthic Vegetation*, 123, 295-305. Springer, Berlin.
- Rydberg, L., *et al.*, 1990. Interaction between supply of nutrients, primary production, sedimentation and oxygen consumption in SE Kattegat. *Ambio*, 19 134-141.
- Sakanishi, Y., *et al.*, 1990. Seasonal changes in photosynthetic capacity of *Laminaria longissima* Miyabe (Phaeophyta). *Jpn. J. Phycol.*, 38 147-153.
- Sakanishi, Y., *et al.*, 1991. Photosynthetic capacity of various parts of the blade of *Laminaria longissima* Miyabe (Phaeophyta). *Jpn. J. Phycol.*, 39 239-243.
- Sánchez-Moyano, J. E., *et al.*, 2001. Effect of the vegetative cycle of *Caulerpa prolifera* on the spatio-temporal variation of invertebrate macrofauna. *Aquatic Botany*, 70 (2): 163-174.
- Sand-Jensen, K. i Borum, J., 1991. Interactions among phytoplankton, periphyton, and macrophytes in temperate freshwaters and estuaries. *Aquatic Botany*, 41 137-175.
- Sato, M., *et al.*, 1996. Distribution of neuroexcitatory amino acids in marine algae. *Phytochemistry*, 42 (6): 1595-1597.

- Schramm, W. i Nienhuis, P. H., 1996. Marine Benthic Vegetation. Recent changes and the effects of eutrophication. *Ecological Studies*: 470.
- Sfriso, A. i Marcomini, A., 1996. "Italy. The lagoon of Venice", a *Marine Benthic Vegetation. Recent changes and the effects of eutrophication*, Springer, Berlin.
- Skartveit, A. i Olseth, J. A., 1988. Varighetstabeller for timevis belysning mot 5 flater på 16 norske stasjoner. *Duration-tables of hourly irradiance to 5 areas at 16 Norwegian stations*: 136.
- Solidoro, C., *et al.*, 1995. A model for macroalgae and phytoplankton in the Venice Lagoon. *Environment Int.*, (21): 619-626.
- Sundbäck, K., *et al.*, 1990. Impact of accumulating drifting macroalgae on a shallow-water sediment system: an experimental study. *Marine Ecology Progress Series*, 58 261-274.
- Terrados, J., 1991. Crecimiento y producción de las praderas de macrófitos del Mar Menor, Murcia. Ph. D., 229 pp., *Departamento de Biología Animal y Ecología*, Universidad de Murcia.
- Terrados, J. i Ros, J., 1995. Temporal variation of the biomass and structure of *Caulerpa prolifera* (Forsskal) Lamouroux meadows in the Mar Menor lagoon (SE Spain). *Scientia Marina*, 59 (1): 49-56.
- Valiela, I., 1995. Marine Ecological Processes:
- Valiela, I., *et al.*, 1997. Macroalgal blooms in shallow estuaries: Controls and ecophysiological and ecosystem consequences. *Limnol. Oceanogr.*, 42 (5, part 2): 1105-1118.
- van Es, F. B., 1982. Community metabolism of intertidal flats in the Ems-Dollar Estuary. *Mar. Biol.*, 66 95-108.
- Vest, S. E. i Dawes, C. J., 1983. Distribution of Caulerpin and Caulerpicin in Eight species of the Green Alga *Caulerpa* (Caulerpales). *Botanica Marina*, 26 313-316.
- Viaroli, P., *et al.*, 1996. Macrophyte communities and their impact on benthic fluxes of oxygen, sulphide and nutrients in shallow eutrophic environments. *Hydrobiologia*, 329 105-119.
- Viaroli, P., *et al.*, 1995. Oxygen fluxes and dystrophy in a coastal lagoon colonized by *Ulva rigida* (Sacca di Goro, Po River Delta, northern Italy). *Fresen. Environ. Bull.*, 4 381-386.

- Vidal, M., 1994. Phosphate dynamics tied to sediment disturbances in Alfacs Bay (NW Mediterranean). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 110 211-221.
- Vidal, M., *et al.*, 1992. Factors controlling spatial variability in ammonium release within an estuarine bay (Alfacs Bay, Ebro Delta, NW Mediterranean). *Hydrobiologia*, 235/236 519-525.
- Vidal, M., *et al.*, 1997. Factors controlling seasonal variability of benthic ammonium release and oxygen uptake in Alfacs Bay (Ebro Delta, NW Mediterranean). *Hydrobiologia*, 350 169-178.
- Vidal, M., *et al.*, 1989. "Sediment-water nutrient fluxes: Preliminary results of *in situ* measurements in Alfaques Bay, Ebro River Delta", a *Topics in Marine Biology*, 53, 505-511.
- Welsh, B. L., *et al.*, 1985. Water Column Anoxia in seaweed systems of southern New England. *Eighth Biennial International Estuarine Research Conference*, 8(2B): 46A.
- Wheeler, W. N., 1980. Effect of boundary layer transport on the fixation of carbon by the giant kelp *Macrocystis pyrifera*. *Mar. Biol.*, 56 103-110.
- Whittaker, R. H., 1969. New concepts of kingdoms of organisms. *Science*, 163 150-160.
- Williams, S. L., 1981. *Caulerpa cupresoides*: The relationship of the uptake of sediment ammonium and of algal decomposition for seagrass bed development.:

Capítol 6. Balanços d'oxigen

Capítol 6 . Balanços d'oxigen

Introducció

Unes de les mesures més importants del funcionament d'un ecosistema són els valors de producció i respiració de tota la comunitat. Sovint es fa servir el terme "metabolisme d'oxigen" per referir-se a la diferència entre la producció primària bruta i la respiració, aplicat tant a una part de la comunitat (Dollar *et al.* 1991), com al seu conjunt (Kenney *et al.* 1988, Smith i Hollibaugh 1993, Heath 1995, Caffrey *et al.* 1998, Petersen *et al.* 1998, Ziegler i Benner 1998, Caffrey 2003, McTammany *et al.* 2003). Així, de la mateixa manera que el metabolisme d'un organisme pot ser emprat com un índex general de la seva salut o estat fisiològic (e.g. Prosser i Brown 1965), les mesures metabòliques de comunitats senceres per a alguns autors poden indicar salut i vitalitat ecològiques (Odum 1967, Odum 1971).

L'interès per aquest tipus de mesures es remonta al menys als 50, en ecosistemes aquàtics tant d'aigua dolça com marins (Kemp i Boynton 1980). Es parteix de la base que el metabolisme biològic del sistema es pot inferir a partir de cicles diaris d'oxigen dissolt (OD) de la columna d'aigua, on s'assumeix que l'increment de les concentracions durant la llum del dia és atribuïble a fotosíntesi neta, mentre les davallades durant la nit són a causa de la respiració. Llavors es poden aplicar correccions per incloure l'efecte dels processos físics, d'advecció i difusió en cossos d'aigua oberts i de l'intercanvi de gasos amb l'atmosfera, i poder refinar així les mesures. A partir d'estudis com aquests s'elaboren models conceptuals, que d'una manera o d'una altra, es tradueixen en models numèrics per analitzar quantitativament els processos ecològics d'interès (Nixon i Oviat 1973, Munekage 1992, Chapelle *et al.* 1994, Solidoro *et al.* 1996, Wang *et al.* 1999, Romero *et al.* 2003).

En el nostre cas, s'ha enfocat l'estudi de la dinàmica d'oxigen de la badia dels Alfacs a través d'un balanç numèric determinístic de massa d'oxigen, que considera tant els processos biològics com físics (Jørgensen 1994). Els models de balanços de massa determinístics, com l'emprat aquí, poden ser eines molt útils per sintetitzar nombroses funcions ambientals, i per proveir-nos d'un millor enteniment dels mecanismes causa-efecte que es troben darrera d'observacions empíriques (Bierman *et al.* 1994). A més, ens permeten quantificar el grau de contribució dels diferents factors biòtics i abiòtics de l'ecosistema en la dinàmica anual del balanç i en situacions concretes d'interès, com per exemple, en el nostre cas, l'aparició d'hipòxies (veure capítols previs): aquest va ser, doncs, el primer objectiu d'aquest capítol.

Aquests balanços ens permeten definir si un sistema és "autòtrof" o "heteròtrof", tot definint "autòtrof" com aquell sistema en el qual el seu consum de carboni (i, per tant, la seva demanda d'oxigen) sigui igual o inferior a la seva producció. Contràriament, considerarem un sistema "heteròtrof" aquell en el qual el seu consum de carboni (i, per tant, la seva demanda d'oxigen) sigui superior a la seva

producció. Aquest fet implica forçosament entrades de carboni orgànic des de fora del sistema, i, a la vegada, un dèficit potencial d'oxigen.

En general, s'ha suggerit que la majoria de sistemes costaners somers són heterotròfics en balanç anual (Smith i Hollibaugh 1993), malgrat els sistemes costaners en procés d'eutrofització cultural¹⁵ poden ser netament autotròfics (Smith i Mackenzie 1987, Smith *et al.* 1991). Carmouze *et al.* (1991) van comentar que és difícil trobar un patró comú d'autotròfia o heterotròfia a tots els sistemes costaners somers, per que les comunitats d'organismes fotosintètics són diverses, els estudis de metabolisme de la comunitat són pocs, i els mètodes emprats són molt variats. Tradicionalment s'han fet servir per estimar el grau d'autotròfia d'ecosistemes aquàtics la producció bruta (PB) i la respiració (R) de forma conjunta del plàncton i del bentos. Kemp *et al.* (1992) van formular de manera general que la respiració planctònica de sistemes marins costaners excedia a la bentònica per sistemes amb més de 5 m de fondària (o en cas de ser estratificats la major part de l'any, 5m de fondària de la seva capa inferior); per tant, en la majoria d'aquests sistemes la respiració de la columna d'aigua era la fonamental responsable de les davallades estacionals d'oxigen dissolt a la capa fonda.

Un segon objectiu d'aquest capítol va ser doncs esbrinar com s'inscrivía la badia dels Alfacs en aquest eix autotròfia-heterotròfia. Per fer-ho, vam analitzar primer a quines variables el balanç (o model) era més sensible. I es van escollir algunes d'entre les més importants per tal de millorar l'ajust que aconseguia el balanç

En aquesta línia, s'han analitzat els efectes sobre la concentració d'oxigen dissolt, de perturbacions de magnitud comparable sobre diferents elements de l'ecosistema; és a dir, la *sensibilitat* de l'oxigen dissolt a canvis en aquests elements. I també s'ha analitzat com afecten aquests canvis a la diferència (o "discrepància") entre l'oxigen dissolt estimat i l'observat *in situ* a la badia dels Alfacs.

Val a dir que hi ha una sèrie d'enfocs diferents a la literatura a l'hora de voler definir l'*anàlisi de sensibilitat* d'un model. Es parteix de la base generalment acceptada que una anàlisi de sensibilitat és un procés en el qual s'estableix la sensibilitat relativa de les prediccions del model, a canvis en els valors dels paràmetres del model (Beck 1983). D'estudis de sensibilitat n'hi ha molts, i molts són també els mètodes emprats per a descriure la sensibilitat d'una variable ecològica a canvis en el sistema (Wen *et al.* 1981, Wen *et al.* 1982, Di-Toro 1993, Bierman *et al.* 1994, Park *et al.* 1996, Solidoro *et al.* 1996, Bocci *et al.* 1997, Pastres *et al.* 1997). Gardner *et al.* (1981) i Jørgensen (1993) van suggerir que aquest estudi de sensibilitat es fes canviant paràmetres individuals, i examinant la corresponent resposta sobre la variable d'estat¹⁶ seleccionada. Aquesta metodologia ha estat

¹⁵ La directament influenciada per l'acció humana (Jørgensen i Richardson 1996)

¹⁶ Una "variable d'estat" és senzillament un aspecte del sistema estudiat o modelitzat que canvia amb el temps i que és depenent dels valors de les altres variables. En models de balanços de massa en ecologia, seria una variable com la concentració d'una substància en funció del temps, que pot rebre entrades i sortides de matèria en cada moment, i que sol ser la variable d'interès en el model.

l'emprada per una sèrie d'estudis previs (Chapelle *et al.* 1994, Schladow i Hamilton 1997, Loehle 1997, Anastacio *et al.* 1999, Hart *et al.* 2000), i també ha estat la utilitzada en aquesta tesi doctoral.

De forma addicional, s'ha efectuat una calibració puntual de tres paràmetres clau del model tan sols, a fi i efecte de respondre algunes preguntes concretes de la discussió del capítol, i no tant amb l'objectiu de fer una calibració exhaustiva de tot el model com han fet altres estudis molt més centrats en la modelització numèrica d'ecosistemes (Di-Toro 1993, Bierman *et al.* 1994, Chapelle *et al.* 1994, Park *et al.* 1996, Hamilton i Schladow 1997, Schladow i Hamilton 1997, Hamilton i Herzfeld 2001)¹⁷.

En resum, doncs, en aquest capítol s'estima mitjançant un balanç o model numèric el grau de contribució de cada factor biòtic i abiòtic de l'ecosistema al seu balanç d'oxigen dissolt, es determina l'estat tròfic actual de la badia, s'apunta quins són els elements de l'ecosistema als que l'oxigen dissolt és més sensible, i es discuteix finalment alguns aspectes globals de la dinàmica d'oxigen de la badia a la llum també dels resultats de capítols previs.

¹⁷ La modelització numèrica aplicada a l'ecologia ofereix moltes possibilitats que no s'han fet servir aquí per que s'escapaven de l'abast d'aquesta tesi; per una visió global més àmplia de les seves possibilitats i metodologies, consultar, per a ecosistemes aquàtics, Thomann i Mueller (1987b), i per modelització en ecologia en general, Jørgensen (1994) i Soetaert *et al.* (2000).

Metodologia

Origen i tractament de les dades

Per estimar els balanços d'oxigen s'ha integrat informació i resultats de capítols previs, sobre la magnitud i variabilitat a l'espai i al temps de diferents processos que aporten o retiren oxigen de l'aigua. Això s'ha realitzat mitjançant un model numèric de càlcul de balanços de massa, desenvolupat específicament per a la badia dels Alfacs (veure l'Annex D) sobre el model d'oxigen dissolt "OMMEL"), però a l'hora aplicable a altres estuaris micromareals o badies i llacunes costaneres amb aportos d'aigua dolça. En aquest model hem emprat (Taula 6.1):

- "*variables d'estat*" (les variables de les quals calculem la seva massa o concentració), varien en funció del temps, i són dependents d'altres variables. Exemple: concentració d'oxigen dissolt a l'aigua.
- *altres variables* (que no són "d'estat", però que són calculades pel model, i són independents de les variables d'estat que ajuden a calcular). Exemple: producció primària de les macroalgues bentòniques.
- *paràmetres* (amb valor constant al llarg de la simulació). Exemple: dimensions de la badia dels Alfacs.
- *funcions de forçament* (equiparables a paràmetres que varien en la simulació, però que no són calculades sinó que són externes al model). Exemple: irradiància incident en funció del temps.

L'única variable d'estat considerada és la concentració d'oxigen dissolt. Els valors dels paràmetres són els que apareixen a la Taula 6.2, més la constant d'extinció de la llum per la biomassa de les macroalgues (Capítol 5, plana 210). Els valors de les funcions de forçament són els que s'han anat mostrant al llarg de la tesi en capítols previs (Taula 6.1). Quan ha mancat alguna dada, s'ha agafat generalment el valor mitjà de les setmanes o mesos adjacents, i en alguns casos, la mitjana anual o el valor de les condicions equivalents mesurades altres anys. Les dades emprades com a valors observats de cicle anual van procedir del punt central de la badia (assimilable a l'estació *Mig*, a efectes pràctics), setmana a setmana durant 1997. Les dades observades corresponents al mes de setembre van ser les enregistrades per la sonda multiparamètrica entre el 16 i el 21 de setembre de 1997 (Capítol 3, plana 126).

El criteri de signes emprat en el balanç ha estat que valors positius de balanç parcial indiquen entrada neta d'oxigen al compartiment, i negatius, indiquen sortida.

L'equació general del balanç d'oxigen, de forma senzilla, es pot escriure com:

$$OD(t_2) = OD(t_1) + \frac{\Delta OD}{\Delta t}(t_2 - t_1) \quad <6.1>$$

on ΔOD és l'increment de concentració d'oxigen dissolt (mg l^{-1}) respecte Δt , el diferencial de temps (h). És a dir, la concentració d'oxigen dissolt en un instant de temps (t_2), es correspon amb la

concentració d'oxigen dissolt que hi havia en l'instant de temps anterior (t_1), més el canvi net entre els dos instants de temps (t_2 i t_1). El canvi, a la seva vegada, es calcula com:

$$\frac{\Delta OD}{\Delta t} = \overbrace{\underbrace{PPB_{plc}}_{\text{fitoplàncton}} - \underbrace{R_{plc}}_{\text{DRC}_2}}^{\text{plàncton}} + \overbrace{\underbrace{PPB_{bnt(\mu ftob)}}_{\text{microfitobentos}} + \underbrace{PPN_{bnt(mac)}}_{\text{macroalgues}} - \underbrace{R_{bnt(sed^*)}}_{\text{sediment sense mac.}}}_{\text{bentos}} + \overbrace{\underbrace{FOD_{hid}}_{\text{hidrodinamisme}} + \underbrace{FOD_{aer}}_{\text{intercanvi amb atmosfera}}}_{\text{PROCESSOS FÍSICS}} \quad <6.2>$$

on PPB_{plc} i R_{plc} són la producció primària bruta i la respiració, respectivament, del plàncton, ja introduïdes al Capítol 4 (plana 157). PPB_{bnt} , PPN_{bnt} i R_{bnt} són respectivament la producció primària bruta, producció primària neta, i respiració dels elements del bentos especificats en els seus subíndexos: producció bruta per al microfitobentos ($PPB_{bnt(\mu ftob)}$) a partir de Delgado (1986, via ^{14}C), respiració del sediment sense macroalgues però incloent el microfitobentos ($R_{bnt(sed^*)}$), i producció neta de les macroalgues ($PPN_{bnt(mac)}$), totes elles expressades per unitat de temps, i si no s'indica el contrari, explicades al Capítol 5 (plana 211 i ss). FOD_{hid} és el flux o velocitat de canvi de concentració d'oxigen dissolt a causa de l'hidrodinamisme (tant advecció com intercanvi no advection), explicat al Capítol 1 (plana 25 i ss) i definit amb aquest nom al Capítol 4 (plana 157). I FOD_{aer} és el flux o velocitat de canvi degut a l'intercanvi amb l'atmosfera mediat pel vent, explicat també al Capítol 4 (plana 157). S'ha considerat arbitràriament el llindar de saturació d'oxigen dissolt a l'aigua en 150 %, a partir del qual l'oxigen marxa cap a l'atmosfera en forma de bombolles (a manca d'estudis que en fixin aquest llindar de manera més precisa). Es pot trobar a la Taula 6.1 el recull dels noms de les variables emprades, amb les seves unitats, i a la Figura 6.1 un dibuix esquemàtic del model de balanços d'oxigen de la badia dels Alfacs. Totes les variables s'han expressat en les mateixes unitats ($mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$) a l'hora de fer la integració numèrica.

Val a dir que per al càlcul de la PPB_{plc} s'ha fet servir un model senzill de producció constant a partir de què la irradiància subaquàtica supera un llindar de saturació. S'ha trobat a la literatura que aquesta irradiància de saturació oscil·la al voltant dels $700\ \mu mol\ fotons\ m^{-2}\ s^{-1}$ (Kremer i Nixon 1978, Thomann i Mueller 1987a), però cal tenir en compte que prové d'experiments de fotosíntesi – irradiància de fins a 4 h d'incubació en ampolles amb ^{14}C , i aquest mètode introdueix un biaix que pot ser important, per la limitació de la producció fotosintètica fitoplanctònica que genera (Capítol 4, plana 177). Per tant, s'ha pres un valor arbitrari de $70\ \mu mol\ m^{-2}\ s^{-1}$, que s'ha agafat com a valor de referència similar en altres models d'ecologia d'estuaris (Hamilton i Herzfeld 2001).

L'equació general del balanç (<6.1>) és vàlida per a increments de temps petits. S'ha agafat una hora com a increment de temps dels càlculs dels balanços d'oxigen en general, mentre que per a les anàlisis de sensibilitat i discrepància (veure més avall) s'ha agafat un increment de temps de 0.2 h.

Taula 6.1. Paràmetres, funcions de forçament i principals variables calculades. (Llegenda de codis emprats en els gràfics i taules d'aquest capítol).

Tipus	Nom	Codi	Unitats
<i>Variable d'estat</i>	Oxigen dissolt	OD	mg O ₂ l ⁻¹
<i>Altres variables</i>			
	Flux d'aireig pel vent	FOD _{vent}	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
	Fluxos d'oxigen dissolt a causa de l'hidrodinamisme	FOD _{hid}	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
	Hores a saturació lumínica	H _{sat}	h
	Irradiància subaquàtica	iwz	μmol m ⁻² s ⁻¹
	Producció primària bruta, neta i respiració planctòniques	PPB _{plc} , PPN _{plc} , R _{plc}	mg O ₂ l ⁻¹ h ⁻¹
	Producció primària bruta, neta i respiració bentòniques	PPB _{bnt} , PPN _{bnt} , R _{bnt}	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹
	Balanç Net de l'Ecosistema	BNE	mg O ₂ m ⁻² d ⁻¹
<i>Paràmetres</i>			
	Àrea basal (en contacte amb sediment)	sup	m ²
	Àrea superficial (en contacte amb l'atmosfera)	supsr	m ²
	Volum de compartiment	vol	m ³
	Constant d'extinció de la llum per la biomassa	K _s	m ² gPS ⁻¹
	Irradiància de saturació del fitoplàncton	I _{sat} ^{f_{top}}	μmol m ⁻² s ⁻¹
<i>Funcions de forçament</i>			
	Concentració de biomassa fitoplanctònica, en termes de 'Clorofil·la a.'	Cla	mg m ⁻³
	Biomassa macroalgal	biom	gPS ⁻¹ m ⁻²
	Constant d'extinció de la llum per la fondària	K _z	m ⁻¹
	Demanda biològica d'oxigen, o respiració del plàncton	DBO ₅	mg O ₂ l ⁻¹ (5d) ⁻¹
	Flux d'entrada d'aigua dolça pel canal 'xxx'	F _{xxx}	m ³ h ⁻¹
	Irradiància de compensació de les macroalgues (corbes F-I)	I _c ^{mac}	μmol m ⁻² s ⁻¹
	Irradiància de saturació de les macroalgues (corbes F-I)	I _{sat} ^{mac}	μmol m ⁻² s ⁻¹
	Producció del microfitobentos (P.B.)	P _m ^{mfb}	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹
	Producció màxima de les macroalgues (P.N., corbes F-I)	P _m ^{mac}	mg O ₂ gPS ⁻¹ h ⁻¹
	Productivitat de la 'Cl.a' del fitoplàncton (P.B.).	P _m ^{Cla}	mg C mg Chla ⁻¹ h ⁻¹
	Radiació solar	RS _h	W m ⁻²
	Respiració del sediment (sense macroalgues)	R _{sedr}	mg O ₂ m ⁻² h ⁻¹
	Salinitat mitjana de compartiment	sal	psu
	Salinitat superficial en contacte amb l'aire	salsup	psu
	Temperatura mitjana de compartiment	temp	C
	Temperatura superficial en contacte amb l'aire	tempsup	C
	Velocitat del vent (mitjana horària)	V _{vent}	m s ⁻¹

P.B. = Producció Bruta. P.N. = Producció Neta.

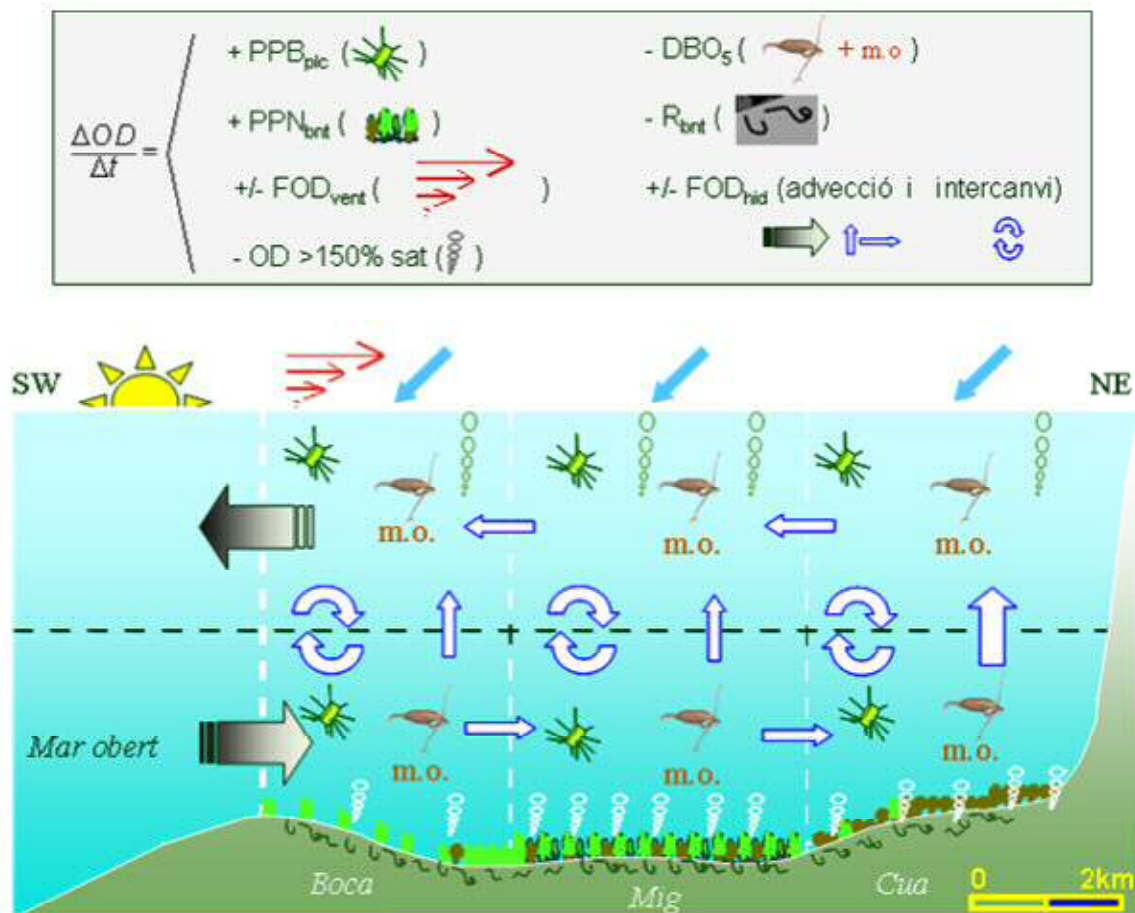


Figura 6.1. Esquema del model de balanços d'oxigen per a la badia dels Alfacs: (a) termes de què depèn la velocitat de canvi de l'OD, (b) representació esquemàtica del model conceptual OMMEL sobre un tall longitudinal de la badia.

A partir de la sortida numèrica dels balanços per a tot l'any s'ha calculat l'índex Producció Primària Bruta : Respiració (PPB:R) per al bentos i plàncton, que de forma conjunta es pot considerar l'índex metabòlic del sistema (Heath 1995). Quan pren valors més grans que 1, la comunitat és autòtrofa; quan són menors, heteròtrofa. La diferència entre la producció i respiració biològiques en ecosistemes marins costaners ha rebut diferents noms, malgrat de vegades la diferència entre els termes emprats no ha estat clara. Entre aquests termes s'inclouen el "metabolisme net de la comunitat" (Kemp i Boynton 1980, van Es 1982, Andersen i Kristensen 1988, Clavier *et al.* 1994, Hopkinson i Vallino 1995, Boynton *et al.* 1997), el "metabolisme net de l'ecosistema" (Dollar *et al.* 1991, Kemp *et al.* 1993, Kemp *et al.* 1997), o la "producció neta de l'ecosistema" (Odum 1969, D'Avanzo *et al.* 1996, Smith i Hollibaugh 1997, Swaney *et al.* 1999). Aquí, a la diferència entre producció bruta i respiració, expressada com a massa de Carboni (o oxigen equivalent) per unitat de superfície (Taula 6.2) i temps, se l'ha anomenat com a "producció neta de l'ecosistema" (PNE, en $g C m^{-2} a^{-1}$, ó $g O_2 m^{-2} a^{-1}$). En canvi, s'ha emprat el terme "balanç net de l'ecosistema" (BNE, en $Tm O_2 a^{-1}$), quan s'han tingut en compte també les variables dels factors físics de l'ecosistema com l'hidrodinamisme i la velocitat del

vent. Així, el BNE és igual als guanys menys les pèrdues totals d'oxigen de l'ecosistema. Cal notar que la literatura anglosaxona fa servir el terme "productivity" per aquesta mesura de producció (en $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, ó $\text{g O}_2 \text{m}^{-2} \text{a}^{-1}$), però el terme equivalent en parla catalana és "producció" i no "productivitat" (Margalef 1974), ja que aquesta darrera es reserva a les mesures expressades per unitat de biomassa (per exemple, $\text{g O}_2 \text{mg Cl.a}^{-1} \text{h}^{-1}$).

Taula 6.2. Dimensions de la badia considerades en els càlculs.

Caixa		Volum	Àrea basal	Àrea superficial	Fondària inicial	Fondària final
n	nom	m^3	m^2	m^2	m	m
1	<i>boF</i>	32.100.000	12.100.000	0	2,75	5,5
2	<i>miF</i>	27.000.000	9.100.000	0	2,75	5,5
3	<i>cuF</i>	25.000.000	10.800.000	0	2,5	5
4	<i>cuS</i>	33.000.000	0	16.000.000	0	2,5
5	<i>miS</i>	28.000.000	0	13.000.000	0	2,75
6	<i>boS</i>	36.000.000	0	15.000.000	0	2,75

El signe decimal s'ha representat en aquesta taula per la coma (","), fent servir punts per separar xifres dels números grans

Les mesures de producció primària s'han expressat en termes de carboni quan ha fet falta per comparar amb les mateixes unitats de producció expressades a la literatura científica. La conversió entre oxigen alliberat i carboni incorporat (produït), s'ha realitzat considerant la relació estequiomètrica 1 mol O_2 : 1 mol C, com s'ha fet en estudis previs¹⁸ pel quocient fotosintètic (Nixon *et al.* 1986, Oviatt *et al.* 1986) o pel quocient respiratori (Smith i Hollibaugh 1997, Fourqurean *et al.* 1997).

Anàlisi de sensibilitat i discrepància

El concepte de "sensibilitat" que farem servir aquí, es calcula a partir de dues taxes de canvi: una a partir de la variable d'estat d'interès (la "taxa de canvi prima" de l'oxigen dissolt), i l'altre a partir d'un paràmetre que es vol posar sota anàlisi (equacions <6.3> i <6.4>).

¹⁸ Aquesta relació és generalment propera a 1 i per senzillesa de càlcul aquest és el valor que hem considerat al llarg de la tesi. Es pot trobar, per exemple, que pel que fa a estudis algals de quocients fotosintètics (QF = producció bruta d' O_2 / consum brut de CO_2) i quocients respiratoris (QR = producció CO_2 / consum O_2), la variabilitat no es dona tant entre espècies de fitoplàncton (QF ca. 1.0, Bender *et al.* 1987, QR = 0.85 - 1.0, Williams 1982, Pomeroy *et al.* 1995) sinó entre les diferents fonts emprades de carboni (QR = 0.7 - 1.0, Elliot i Davison 1975) o de nitrogen (QF = 1.5 ± 0.2 i 1.3 ± 0.2 , per a creixement sobre NO_3^- i NH_4^+ respectivament, Langdon 1988, amb cites puntuals de 2.2, Iriarte *et al.* 1997). Algunes macroalgues han mostrat QF superiors a 1.0 (Johnston *et al.* 1992). Simples correlacions de mesures per sensors químics de CO_2 i O_2 a 20m de fondària a l'aigua fonda de plataforma continental de Louisiana van donar una relació O:C de 1.39 (Degrandpre *et al.* 1997). Andersen i Kristensen (1988) va analitzar en microcosmos els quocients fotosintètics de la comunitat (QFC) i els quocients respiratoris de la comunitat (QRC), amb valors mitjans de QFC de 0.81 i de QRC propers a 1. Clavier *et al.* (1994) va descriure per a un sistema costaner dels EUA un QFC mitjà de 1.03 ± 0.08 (n=18) i un QRC de 1.14 ± 0.05 (n=61).

La taxa de canvi de l'OD és l'increment d'oxigen (ΔOD) per unitat de temps. Ara bé, en el camp de les anàlisis de sensibilitat es fa servir sovint una taxa de canvi que no és produïda per canvis en el temps sinó per canvis en un paràmetre que modifica el valor de l'OD resultant. Així, en aquest capítol s'ha definit i fet servir el terme *taxa de canvi prima* ("taxa de canvi ") de l'OD, que correspon a l'increment d'oxigen dissolt (ΔOD) per unitat de temps dividit per la mitjana d'OD, i que serà representada a partir d'ara com $\Delta OD/OD$. Per tant,

$$\text{Taxa de canvi d'OD} = \frac{\Delta OD}{OD} \quad <6.3>$$

La taxa de canvi d'un paràmetre s'ha definit com a l'increment del paràmetre dividit per la mitjana del paràmetre:

$$\text{Taxa de canvi d'un paràmetre} = \frac{\Delta Par}{Par} \quad <6.4>$$

La sensibilitat (S) ha estat presa com el quocient entre ambdues taxes de canvi esmentades anteriorment (Beck 1983 i Jørgensen 1993):

$$S = \left(\frac{\begin{bmatrix} \Delta var \\ var \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \Delta par \\ par \end{bmatrix}} \right) \quad <6.5>$$

on *var* és la variable d'estat en consideració (oxigen dissolt en aquest cas), i *par* és el paràmetre sobre el qual s'han aplicat els canvis. Adaptant l'equació anterior a la variable d'estat analitzada queda com:

$$S = \left(\frac{\begin{bmatrix} \frac{\Delta OD}{OD} \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} \frac{\Delta par}{par} \end{bmatrix}} \right) \quad <6.6>$$

Per altra banda, s'ha definit amb el terme "discrepància" a la diferència entre l'OD estimat (OD_{est}) i l'OD observat (OD_{obs}):

$$\text{Discrepància} = OD_{est} - OD_{obs} \quad <6.7>$$

En la mateixa línia, s'ha definit la taxa de discrepància en canviar un paràmetre (o valor de la funció de forçament) com la mitjana de les diferències entre les discrepàncies de vàries simulacions, canviant el paràmetre dins el rang considerat, dividida pel valor mig de la discrepància sense canviar el paràmetre:

$$\text{Taxa de discrepància} = \frac{\Delta Disc}{Disc} \quad <6.8>$$

I s'ha definit la taxa de discrepància normalitzada com la taxa de discrepància dividida per la taxa de canvi del paràmetre o del valor de la funció de forçament en qüestió:

$$\text{Taxa de discrepància normalitzada} = \left(\frac{\Delta \text{Disc}}{\text{Disc}} \frac{\Delta \text{Par}}{\text{Par}} \right) \quad <6.9>$$

Per a aquestes anàlisis, s'ha multiplicat cada funció de forçament i algunes variables "no d'estat" del model numèric (altrament anomenades, "variables independents de la concentració l'oxigen dissolt") per un paràmetre constant al llarg del període de simulació. L'estudi de la sensibilitat de l'oxigen dissolt a canvis en algunes variables ecològiques s'ha realitzat a través de canvis en aquest paràmetre multiplicador de la variable, funció de forçament o paràmetre constant del model numèric. Per aquesta raó, a partir d'ara, es farà al·lusió en les anàlisis a algunes variables o funcions de forçament com a paràmetres, fent referència estrictament, de fet, al paràmetre específic multiplicador de la variable o funció de forçament en qüestió. Per cada anàlisi de sensibilitat i discrepància, s'han donat valors creixents uniformement a un paràmetre dins el seu rang de variació escollit, mantenint la resta de paràmetres constants amb el seu valor original. Aquesta anàlisi ha estat efectuada seqüencialment per a tots els paràmetres d'interès.

En el nostre cas, s'ha analitzat la sensibilitat i la taxa de discrepància normalitzada per a canvis del 20% (Janse i Aldenberg 1990) en els paràmetres i variables ecològiques (veure significat de les sigles a la Taula 6.1). Com el rang de valors que pot prendre cada variable en l'ecosistema al llarg d'un cicle anual, per exemple, no és el mateix (Taula 6.3), aquest 20% pot ser molt superior al percentatge de canvi natural d'un paràmetre, comparat amb altres paràmetres. Per aquesta raó, s'ha analitzat també el grau d'influència del rang de variació natural de les variables sobre l'oxigen dissolt, emprant la taxa de canvi d'OD (equació <6.3>), per un costat, i la seva taxa de discrepància, sense normalitzar (equació <6.8>), per l'altre. Això s'ha efectuat tant per a un any sencer com per al mes de setembre, en que és més probable que apareguin les davallades de concentració d'oxigen dissolt a la part profunda de la columna d'aigua.

De les anàlisis efectuades, la taxa de canvi d'OD (equació <6.3>) ens indica la capacitat de modificar la concentració d'OD, a partir del canvi del paràmetre que multiplica la variable independent. L'equació <6.4> ens permet expressar algunes variables de les anàlisis de sensibilitat i discrepància de forma comparable per a tots els paràmetres analitzats, atès que és una mena de ponderació que equilibra l'efecte produït per cada paràmetre sobre la concentració d'oxigen dissolt. Així, l'anàlisi de sensibilitat (equació <6.6>) ens indica la capacitat de cada variable ecològica independent de canviar la concentració d'oxigen dissolt, i ens ho indica de forma comparable amb la resta de variables de l'ecosistema. Aquesta sensibilitat és una mesura de la capacitat potencial de canvi de l'OD que té cada variable independent, per que es troba expressada per unitat de taxa de canvi del paràmetre

Taula 6.3. Contribució parcial d'entrada o sortida d'oxigen a la badia dels Alfacs per cada procés involucrat en el balanç (la part superior en mg O₂ m⁻² d⁻¹, la part inferior en % respecte el total de guanys i pèrdues per separat). Les dades referents a macroalgues provenen de les zones específiques on hi creixen, però s'han expressat aquí respecte m² total de la badia i no només respecte el m² del lloc on hi creixen. Explicació dels codis a la Taula 6.1.

Estació	Biol				Fca		?	Suma		
	Plc.	Mac	Sed.	Inter	canvi	desco-	Guanys	Pèrdues	BNE	
		Cau.	Als.	mar	aire	negut				
mg	O ₂	m ⁻²	d ⁻¹	%	%		%	%		
hivern	2742	-10	-741	-613	-374	-775	470	3212	-2513	699
primav.	2656	2990	1338	-959	-741	-1560	-4584	6983	-7844	-860
estiu	2550	831	183	-2045	-536	-622	308	3872	-3202	670
tardor	1834	-24	-255	-990	-250	-219	-399	1834	-2137	-303
tot l'any	2452	949	132	-1155	-476	-796	-1079	3533	-3506	26,5
hivern	85	0	29	24	15	31	15	100	100	
primav.	38	43	19	12	9	20	58	100	100	
estiu	66	21	5	64	17	19	8	100	100	
tardor	100	1	12	46	12	10	19	100	100	
tot l'any	69	27	4	33	14	23	31	100	100	

Les cel·les ombrejades en gris continu fan referència als percentatges de guanys en el balanç respecte el total, i les ombrejades en gris ratllat, als percentatges de pèrdues.

que multiplica la variable ecològica independent (<6.4>). La taxa de discrepància (eq. <6.8>) indica, per la seva banda, com augmenta la diferència entre OD_{est} i OD_{obs} (eq. <6.7>) a partir de canvis seqüencialment creixents del valor del paràmetre ecològic analitzat. Aquesta anàlisi no es troba ponderada per la taxa de canvi del paràmetre (eq. <6.4>), pel que és apropiada per estudiar comparativament el canvi sobre l'oxigen dissolt dels paràmetres ecològics dins el seu rang natural de variació. La taxa de discrepància normalitzada (eq. <6.9>) ens indica, de forma similar a com fa la sensibilitat (eq. <6.6>), la capacitat potencial d'una variable independent d'apropar els valors estimats d'OD als valors observats.

La "taxa de discrepància" i la "taxa de discrepància normalitzada" definides en aquesta tesi són equivalents a la "funció Cost" i "funció Cost normalitzada" emprades en altres entorns de modelització ecològica (Soetaert *et al.* 2000).

Val la pena puntualitzar que per a les anàlisis de sensibilitat i discrepància, la variable ecològica DBO_n es calcula a partir de la DBO_5 suposant una disminució lineal de la DBO en el temps. I també que el percentatge de variació de la Irradiància de saturació per al fitoplàncton (I_{sat}^{fitop}) ha estat considerat, a manca de dades específiques, el mateix que el mesurat per les macroalgues a nivell anual (Taula 6.3).

Calibració de paràmetres

S'ha realitzat una calibració d'alguns paràmetres del model per tal de minimitzar la discrepància entre els valors observats i els modelats, emprant l'algoritme de Levenberg-Marquardt (Press *et al.* 1993). Aquest és un mètode iteratiu i direccional seguint les derivades dels residus; el mètode millor i més ràpid amb diferència per a problemes relativament simples (Soetaert *et al.* 2000). S'ha escollit la opció de modificar cada paràmetre uniformement dins un rang de valors ampli, que tingués sentit biològic o físic, arribant a un total de 1000 execucions amb combinacions diferents dels paràmetres per la calibració, emprant les rutines numèriques *FEMME* (Soetaert *et al.* 2002).

Resultats

Variació estacional del balanç i Balanç Net de l'Ecosistema

L'evolució al llarg de 1997 de l'OD estimat a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs segueix en general la tendència de l'OD observat (Figura 6.2a, b), tret d'alguns casos com la davallada d'oxigen prevista pel model a l'hivern i que no hem constatat al camp, i el retard del model respecte de la realitat pel que fa a les hipòxies de final d'estiu.

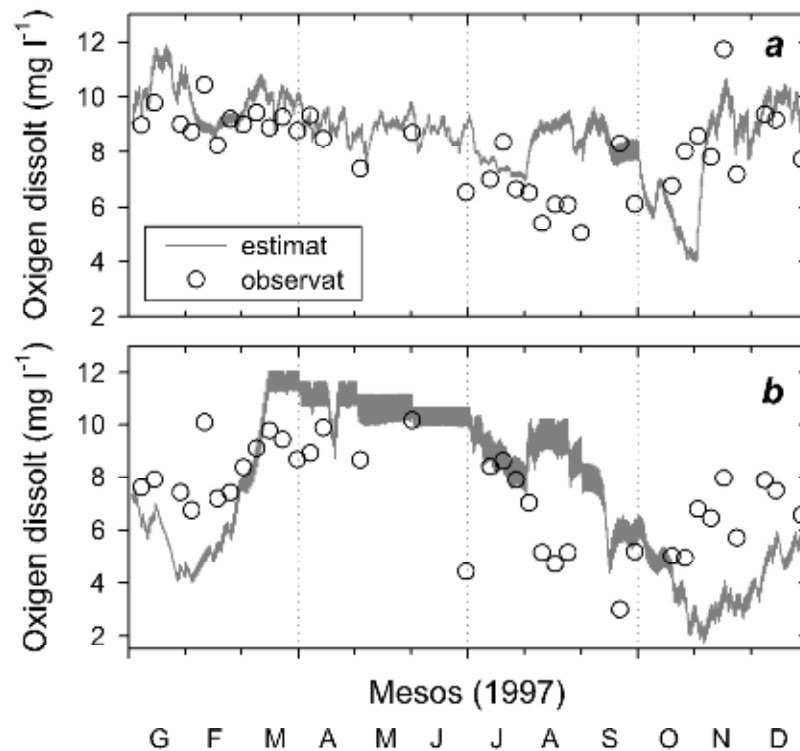


Figura 6.2. Concentració d'oxigen observada vs. esperada a 1997, en (a) la capa superior i (b) la capa del fons de l'estació *Mig* de la badia dels Alfacs.

El balanç net de l'ecosistema és lleugerament positiu en còmput anual ($26.5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), essent clarament positius els balanços parcials d'hivern i estiu amb prop de $700 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ cadascun, i clarament negatius el de primavera ($-860 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) i també, en menor mesura, el de tardor ($-303 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Taula 6.3). Entre els valors de concentració d'oxigen dissolt mesurats al camp i els estimats pel model existeix una discrepància, l'origen de la qual no es coneix amb exactitud. Aquest terme desconegut del balanç es xifra entre el 15% del total dels guanys d'oxigen a l'hivern i el 58% de les pèrdues a primavera. D'entre els elements coneguts del balanç, el fitoplàncton és l'únic productor net d'oxigen en totes les estacions climatològiques. La seva contribució significa el 85% dels guanys nets a l'hivern, el 38% a primavera, el 66% a l'estiu, i és l'únic productor net de la tardor. En segon terme, per quantitat d'aports nets d'oxigen, es troben les macroalgues. A l'hivern i tardor la seva

contribució al balanç es troba pràcticament equilibrada entre els guanys i les pèrdues per *Caulerpa prolifera*, i representa fins a un quart de les pèrdues totals d'oxigen en el cas d'*Alsidium corallinum*. De fet, *Alsidium corallinum* presenta menor aportació neta d'oxigen al balanç que *Caulerpa prolifera* també durant primavera i estiu, quan ambdues tenen un balanç net positiu. El sediment i l'atmosfera són les dues sortides majoritàries de l'oxigen dissolt, representant prop d'un quart de les sortides cadascuna en mitjana anual. L'intercanvi d'oxigen amb mar obert és sempre de tipus d'exportació de prop d'un 15% del total de les sortides.

Variació espacial

L'evolució de l'OD estimat mostra el mateix patró de variació a les tres estacions de mostreig (Figura 6.3a, b, c), amb la diferència que a *Cua* la concentració per tot l'any és generalment molt inferior a la de *Boca* i *Mig*, arribant fins i tot a esgotar-se l'oxigen dissolt a l'hivern en la simulació. S'observa que la contribució màxima horària de les macroalgues és a l'estiu, mentre que la del fitoplàncton és a l'abril i setembre (tret del cas excepcional de gener amb un bloom d'algues dinoflagelades), mostrant una davallada relativa durant l'estiu (Figura 6.3d, e, f). La producció neta màxima de *C. prolifera* és similar a les estacions *Mig* i *Boca* (vora $0.40 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$), i la de *A. corallinum* en *Cua* és unes 4 vegades superior a la de *Mig* (0.62 i $0.16 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$, respectivament). L'estació *Cua* és on es nota més l'efecte de la respiració de les macroalgues (*Alsidium corallinum*, en aquest cas) sobre la velocitat de canvi d'OD (Figura 6.3f). Es constata que existeix un excés d'oxigen dissolt per sobre de saturació la major part de l'any (Figura 6.4c, d, e), que el vent (Figura 6.4a, b) extreu de la capa superficial a una velocitat de fins a $0.2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Figura 6.4f, g, h), amb l'excepció del flux d'entrada a la columna d'aigua que produeix, sobre tot a l'estació *Cua* durant la tardor i hivern, quan l'oxigen es troba per sota de saturació.

Variacions globals

En terme mig anual, l'oxigen es manté per sobre de saturació en la capa superficial de les estacions *Boca* i *Mig*, i prop del 100% en *Cua* (Figura 6.5a, c, e). Per la capa de fons, la disminució del percentatge de saturació és major a mesura que passem de *Boca* a *Mig*, i de *Mig* a *Cua* (Figura 6.5b, d, f).

Els resultats mostren que el fitoplàncton és la principal font d'oxigen per la capa superficial de la badia (Figura 6.5g, i, k, entre 0.05 i $0.08 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$). Per la capa fonda ho són, o bé la producció neta macroalgal, per a les estacions *Boca* i *Mig* amb 0.05 - $0.08 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Figura 6.5h, j), o bé l'hidrodinamisme per a l'estació *Cua* amb $0.03 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (Figura 6.5i). A *Cua* fons, la contribució de la macroalga *Alsidium corallinum* al llarg de les hores de llum del dia és de fins a 4 vegades superior a l'entrada d'oxigen per hidrodinamisme ($0.128 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$ produïts per l'alga, Figura 6.5l). Malgrat tot, aquesta relació canvia radicalment en el còmput del balanç diari anual mig per a tot el compartiment ($2 \cdot 10^9 \text{ mg O}_2 \text{ d}^{-1}$ per *A. corallinum* vs. $17 \cdot 10^9 \text{ mg O}_2 \text{ d}^{-1}$ per l'hidrodinamisme, Figura 6.5r).

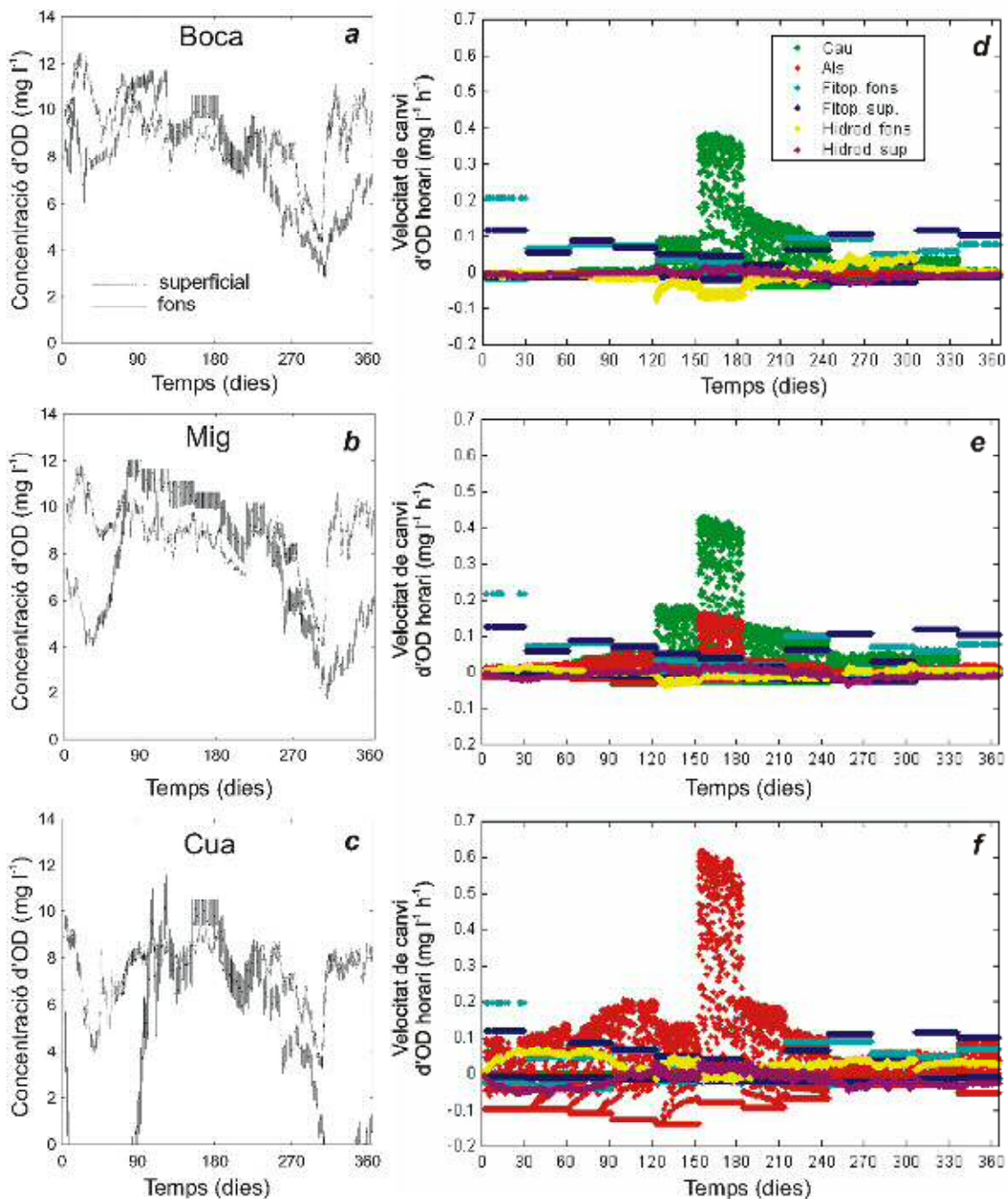


Figura 6.3. Evolució al llarg de l'any 1997 de la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua fruit de la simulació del model de balanços, i contribució parcial de cada procés al balanç horari d'oxigen en les estacions *Boca* (a, d), *Mig* (b, e) i *Cua* (c, f): (a, b, c) concentració d'oxigen dissolt (mg l^{-1}) a la capa superior (línia ratllada) i capa de fons (línia contínua), (d, e, f) contribucions parcials al balanç horari d'oxigen a la columna d'aigua ($\text{mg l}^{-1} \text{h}^{-1}$). Els valors corresponents a productors primaris indiquen producció neta. Cal notar que en alguns mesos concrets la simulació pot donar valors diferents dels reals, mentre que en altres l'ajust és molt millor (veure text per més detalls)

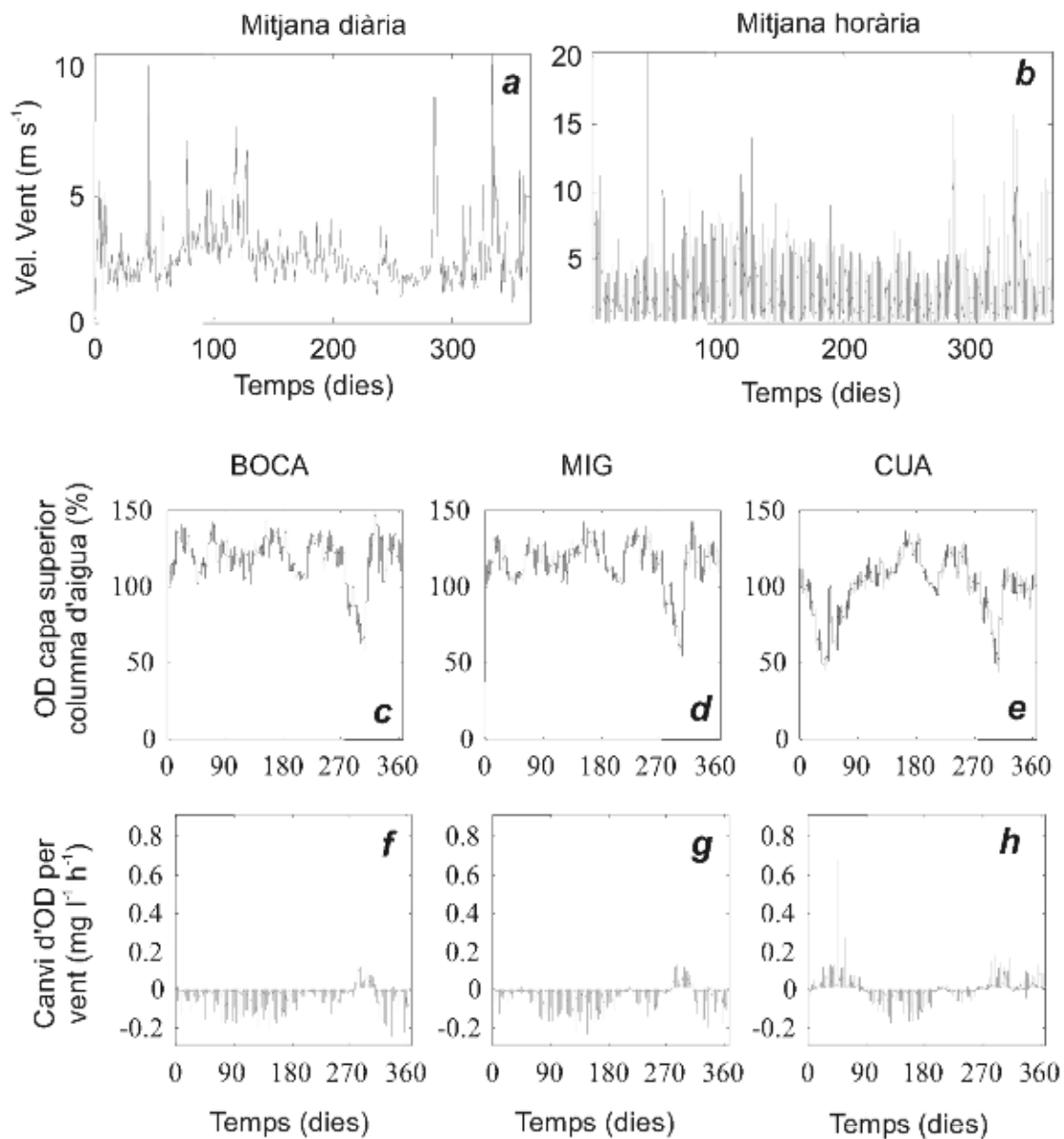


Figura 6.4. Efecte del vent sobre el flux d'oxigen dissolt a través de la superfície de la columna d'aigua: (a) velocitat mitjana diària del vent (m s^{-1}), (b) velocitat mitjana horària del vent (m s^{-1}), (c) concentració d'oxigen dissolt (% de saturació) en l'estació de mostreig *Boca Superior*, (d), el mateix per *Mig Superior*, (e) el mateix per *Cua superior*, (f) velocitat de canvi horari de concentració d'oxigen dissolt ($\text{mg l}^{-1} \text{h}^{-1}$) a causa del vent en l'estació *Boca Superior*, (g), el mateix per *Mig Superior*, (h) el mateix per *Cua superior*.

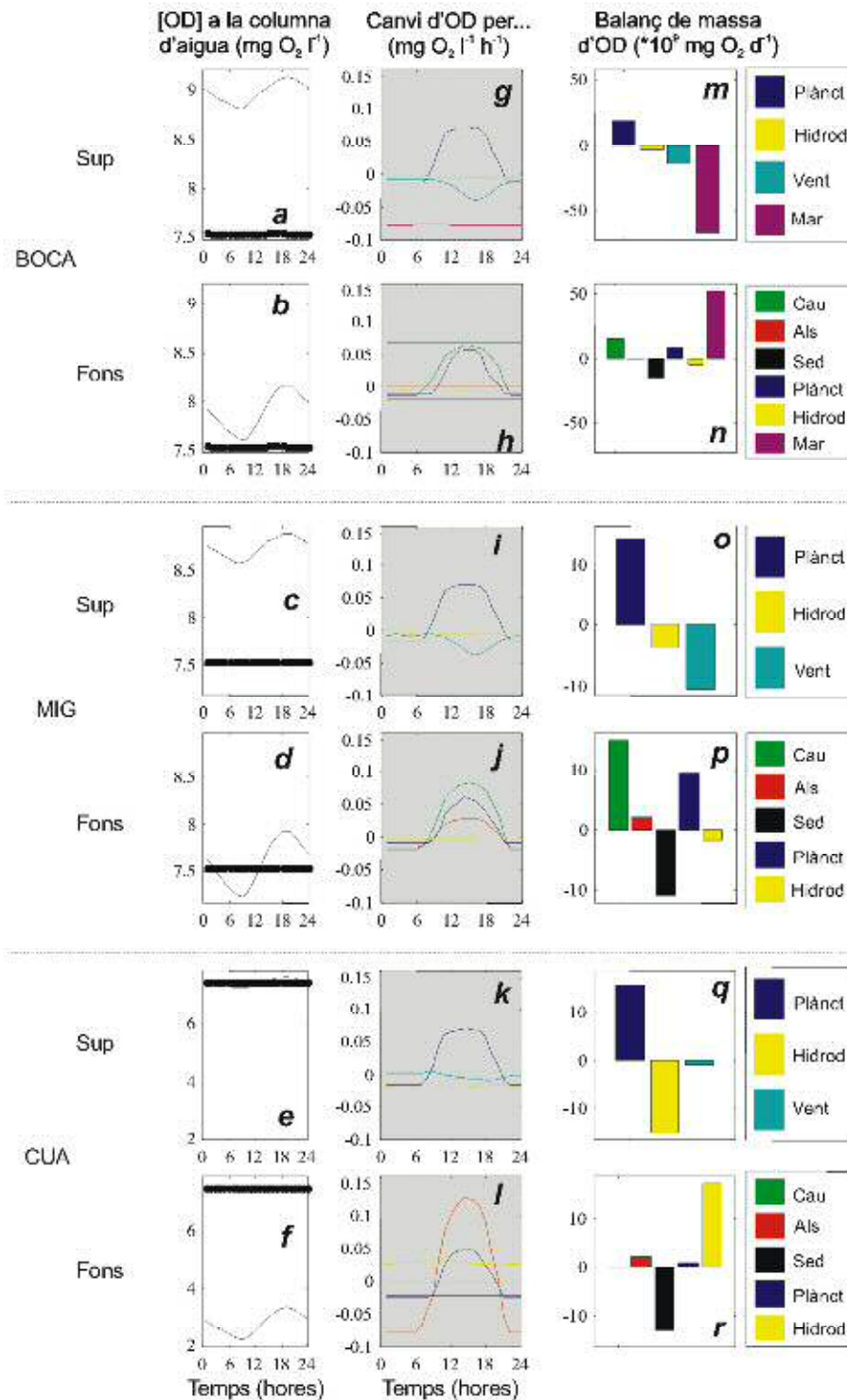


Figura 6.5. Evolució al llarg d'un dia mitjà de 1997 de la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua i de les contribucions parcials al balanç d'oxigen. Per a cada un dels sis punts de mostreig s'ha representat: (a-f) concentració d'oxigen dissolt ($\text{mg O}_2 \text{l}^{-1}$) de la columna d'aigua (línia contínua fina) i concentració d'oxigen equivalent al 100% de saturació amb l'aire per la temperatura i salinitat donades (punts més gruixuts), (g-l) velocitat de canvi horari parcial de cada procés ($\text{mg O}_2 \text{l}^{-1} \text{h}^{-1}$), i (m-r) balanç net diari parcial de cada procés ($\text{mg O}_2 \text{l}^{-1} \text{d}^{-1}$). Els valors corresponents a productors primaris indiquen producció neta.

L'hidrodinamisme té més influència com més allunyat es troba el punt de mostreig respecte el punt d'entrada d'aigua de mar a la badia, Val a dir que del total de contribució per hidrodinamisme de l'estació Boca, la part corresponent únicament a l'intercanvi amb mar obert és molt alta, i es situa entre $-67 \cdot 10^9$ i $52 \cdot 10^9$ mg O₂ d⁻¹ a la capa superficial i fonda, respectivament (Figura 6.5m, n). El sediment és la destinació de la principal sortida neta diària d'oxigen de la capa inferior de la badia (Figura 6.5n, p, r).

La situació de pas de l'estiu a la tardor

La concentració estimada d'oxigen dissolt a la columna d'aigua es manté força estable durant el setembre (Figura 6.6a), amb oscil·lacions a causa del pas de fronts amb densos núvols a la meitat de setembre (Figura 6.6b), i no és fins a l'octubre que la concentració no disminueix progressivament fins a descendir per sota del llindar d'hipòxia en la capa inferior. A mitjans d'octubre va aparèixer un temporal de vent (Figura 6.6c), que probablement devia trencar l'estratificació, malgrat aquest procés no està contemplat en el model actual de balanços d'oxigen. El que sí que es preveu és que aquest vent trauria oxigen dissolt de la capa superficial, fent-ne descendir la seva concentració, tal i com s'observa a la Figura 6.6a. La diferència més notable en els processos ecològics de setembre i octubre es troba en la disminució notable de la contribució del fitoplàncton (Figura 6.6d, en valors horaris, Figura 6.6e-h), reduint-se considerablement tant a la capa superficial com profunda. Les sortides d'oxigen es mantenen força similars entre els dos mesos, inclosa la corresponent a la respiració del sediment. L'altre diferència entre ambdós mesos és la notable major entrada d'oxigen a l'octubre a causa de l'acció del vent (Figura 6.6e, g).

Índex PB:R

El bentos mostra un índex Producció Bruta : Respiració (PB:R) de 0.8 a Cua, de 1.2 a l'estació Mig i igual a 1.0 a Boca (Taula 6.4). El plàncton, en canvi, mostra uns valors molt superiors, que van des de 1.6 a Cua fins a 2.6 a Mig passant per 2.3 a Boca. L'índex PB:R conjunt del plàncton i del bentos és de 1.6 a Boca i Mig, i igual a 1.1 a Cua. Per a tota la badia dels Alfacs en conjunt, aquest índex pren el valor de 1.0 en el cas del bentos, 2.1 en el cas del plàncton i 1.4 en considerar bentos i plàncton alhora.

Sensibilitat i discrepància

La variable que més pot afectar l'oxigen dissolt de la columna d'aigua és la terbolesa de l'aigua (K_z), tant si considerem la dinàmica de tot un any sencer com només la del mes de setembre (Figura 6.7a, b, respecte c, d). Per darrera d'aquesta, en importància, es troben la biomassa de fitoplàncton i la seva productivitat (Cla , P_m^{Cla}), i la respiració del sediment (R_{sed}), en el cas de la capa inferior. Cal notar que els valors de sensibilitat negatius indiquen que els canvis del paràmetre (i per tant, de la variable que representa) i els de l'oxigen dissolt són de signe contrari: és a dir, que mentre el paràmetre augmenta, l'oxigen disminueix, i a l'inrevés. La taxa de discrepància entre OD_{est} i OD_{obs} normalitzada per a un 20 % d'increment, indica que el paràmetre que més influent potencialment sobre l'ajust entre els valors estimats i observats és de nou K_z , tant per a tot l'any a les dues capes

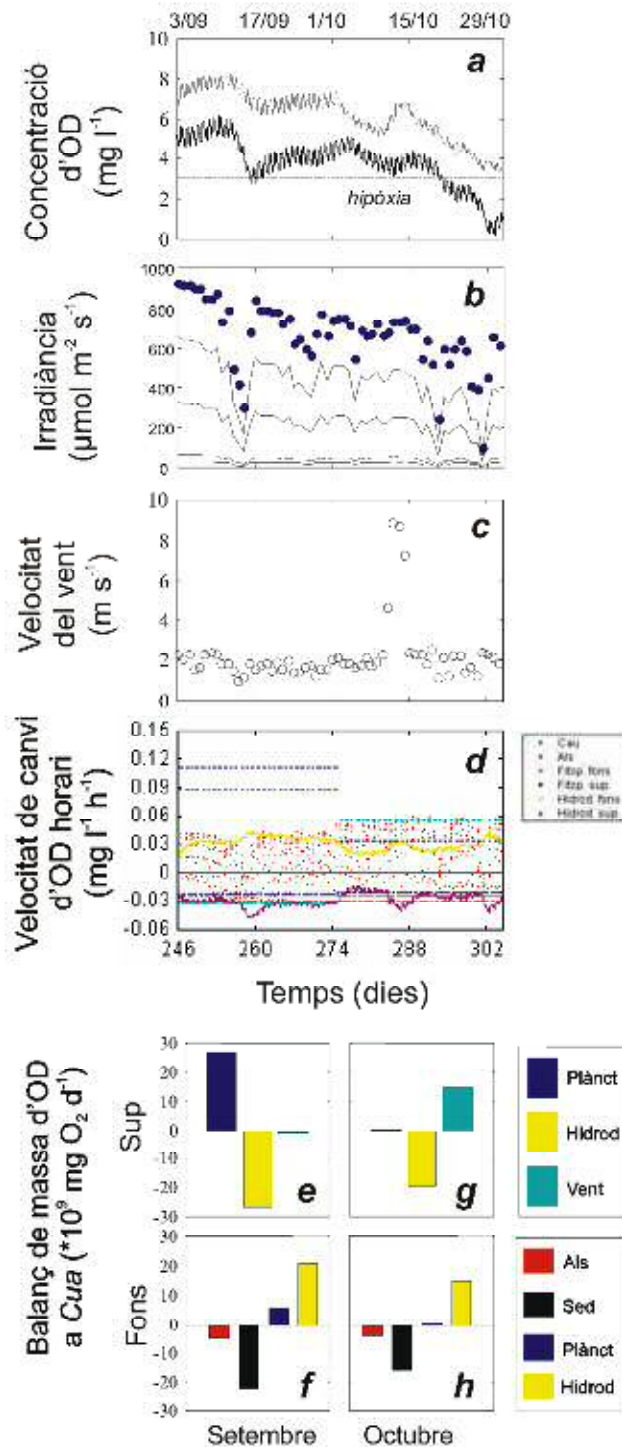


Figura 6.6. Evolució del balanç d'oxigen en els mesos de setembre i octubre, per a l'estació Cua: (a) concentració d'oxigen dissolt (mg l^{-1}) a la capa superior (línia fina) i capa de fons (línia gruixuda), (b) irradiàncies just sobre l'aigua, per sota, al mig de la capa superficial, al mig de la capa profunda, i just sobre les macroalgues, de dalt a baix correlativament, (c) velocitat de vent (mitjana diària), (d) contribucions parcials al balanç horari d'oxigen a la columna d'aigua ($\text{mg l}^{-1} \text{h}^{-1}$), (e) balanç net diari parcial d'oxigen a la capa superficial d'un dia mitjà de setembre (mg d^{-1}), (f) igual que (e) però per la capa profunda, (g)-(h) igual que (e)-(f) però per octubre. Les dades d'irradiància i velocitat del vent són mitjanes diàries. S'ha inclòs en (a), com a referència, una línia discontinua a 3 mg l^{-1} (llindar d'hipòxia).

Taula 6.4. Índex Producció Bruta : Respiració (PB:R) del plàncton i bents de la badia dels Alfacs.

	Boca	Mig	Cua	Alfacs ^a
	sense unitats			
Bentos	1.0	1.2	0.8	1.0
Plàncton	2.3	2.6	1.6	2.1
Bentos i Plàncton	1.6	1.6	1.1	1.4

^a La mitjana per tota la badia és ponderada per a l'extensió de cada compartiment.

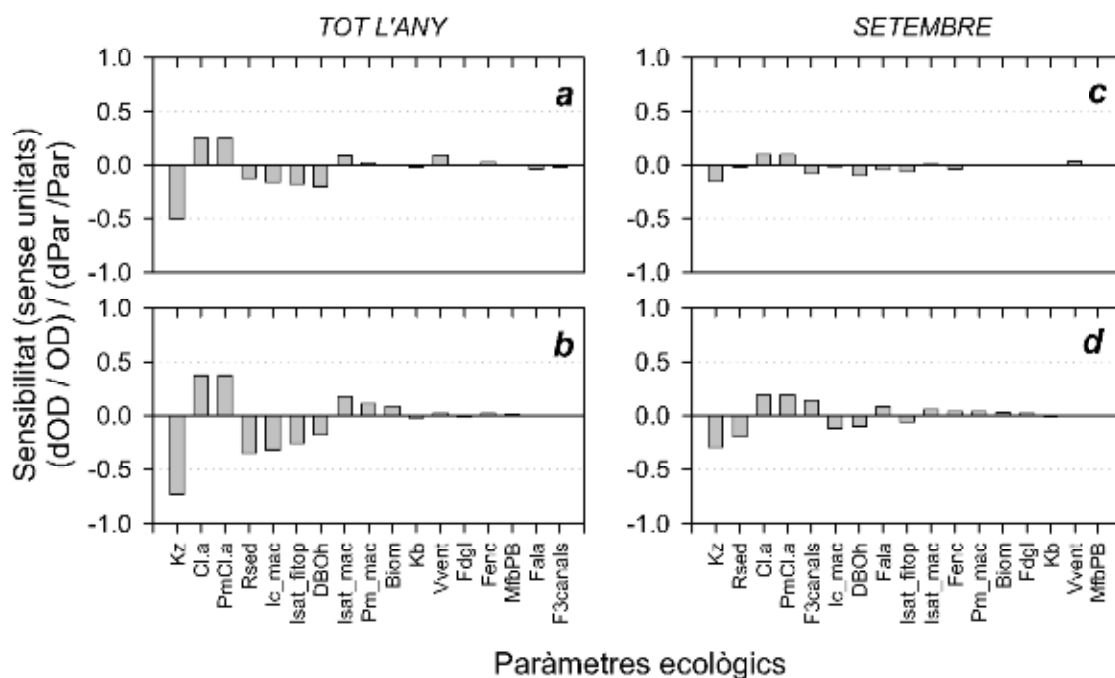


Figura 6.7. Sensibilitat de l'oxigen dissolt en l'estació Mig fons de la badia dels Alfacs a canvis del 20% en algunes funcions de forçament i paràmetres: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua.

(Figura 6.8a, b) com per a setembre en la capa de fons (Figura 6.8d). En segon terme es troben, per a la capa de fons de nou, la concentració de clorofil·la a, Cl_a , la productivitat del fitoplàncton, $P_m^{Cl_a}$, i la respiració del sediment, R_{sed} . Per a la capa superficial, segueixen la velocitat del vent, V_{vent} , la irradiància de saturació del fitoplàncton, I_{sat}^{fitop} , i la demanda bioquímica d'oxigen, DBO (Figura 6.8a).

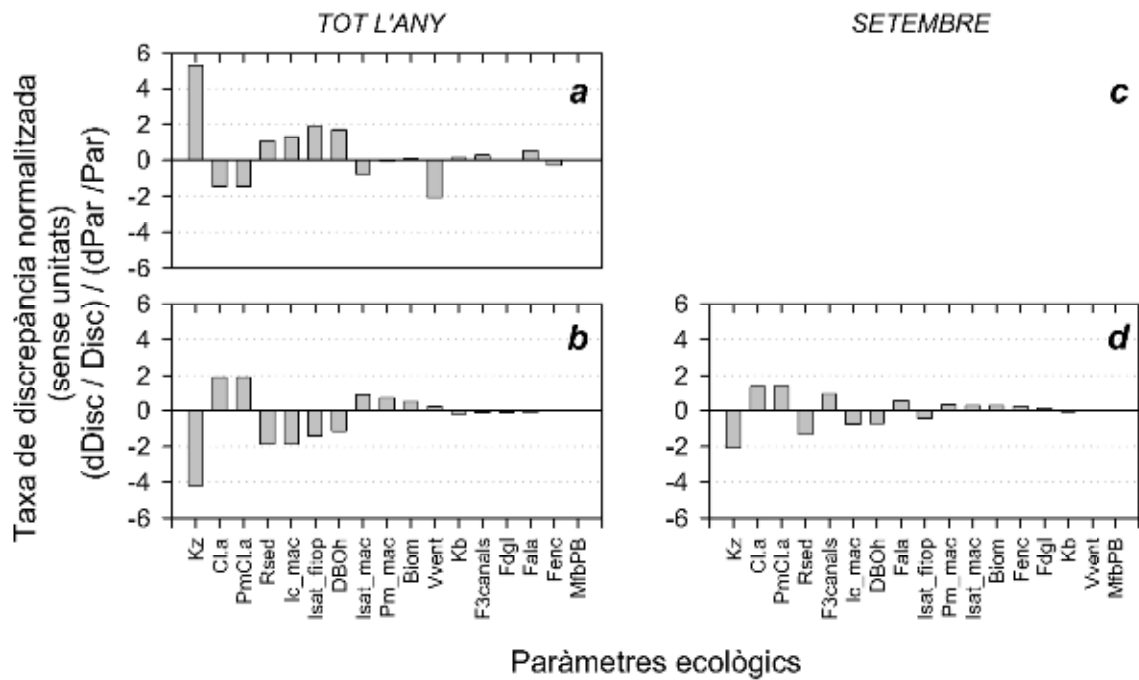


Figura 6.8. Taxa de discrepància entre OD_{est} i OD_{obs} normalitzada per a l'increment del 20% en algunes funcions de forçament i paràmetres: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, inexistent per manca de dades (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. No s'ha dibuixat la subfigura (c) per que les dades per elaborar les figures corresponents al mes de setembre es van elaborar a partir de les dades recollides per la sonda multiparamètrica de micropolsos YSI 600 (veure 0), que en quedar lligada a un mort a prop del fons de la columna d'aigua, no va recollir dades al mateix moment de la capa superficial. En canvi, les subfigures (a) i (b) s'han elaborat a partir de les dades discretes setmanals obtingudes a partir de lectura amb l'oxímetre WTW sobre mostres capturades en ampolles Niskins, tant de la capa superficial com profunda.

Tenint en compte el rang natural de variació dels paràmetres (Taula 6.5), el què més afecta l'oxigen dissolt de la capa superficial és la Cla, juntament amb el flux d'aigua dolça per al cas de setembre (Figura 6.9a, c, respectivament); i per a la capa profunda, ho són la Cla, R_{sed} i I_{sat}^{mac} per a tot l'any (Figura 6.9b), mentre que pel cas específic de setembre ho són R_{sed} , $F_{3canals}$ i Cla (Figura 6.9d). La taxa de discrepància de la capa superficial és modificada en major grau pels canvis dins el rang natural en la velocitat del vent, en la terbolesa de l'aigua, en la irradiància de saturació del fitoplàncton i la dbp (Figura 6.10a). La de la capa profunda, ho és per K_z , I_c^{mac} , i I_{sat}^{fiop} majoritàriament, per al cas de tot l'any (Figura 6.10b), mentre que per al cas de setembre, ho són R_{sed} , $F_{3canals}$ i Cla (Figura 6.10d).

Cal destacar algunes singularitats, a més. Augments en el flux d'entrada d'aigua dolça pels canals ($F_{3canals}$) provoquen majors discrepàncies entre l'OD observat i l'OD estimat quan es considera el rang natural de variació dels paràmetres (Figura 6.10), que no quan es considera un 20 % màxim de variació (Figura 6.8). Tanmateix, l'efecte relatiu dels augments del flux d'entrada d'aigua per qualsevol dels tres canals (o tots tres alhora) sobre l'OD és molt baix si es considera tot l'any (Figura 6.7a,b),

Taula 6.5. Rang natural de variació de tot un any per un costat, i del mes de setembre en concret, per l'altre, de determinats paràmetres ecològics (*funcions de forçament* en el model). Veure unitats i descripció dels codis de les variables a la Taula 6.1. A la columna observacions s'ha inclòs el capítol de la tesi d'on surten les dades emprades aquí. PN = Producció neta, PB = Producció bruta.

Paràmetre	Any			Set			Observacions
	Mitjana	err. est.	% var.	Mitjana	err. est.	% var.	
Biom(Cau)	152	118	78	48	48	100	Cap 5
Biom(Als)	391.5	308.5	79	147	147	100	Cap 5
Cla	5.035	4.465	89	5.735	3.765	66	Cap 2 (1990-95)
DBO ₅	3.47	3.02	87	2.36	1.13	48	Cap 4
F _{dgl} , F _{ala}	9288	5112	55	9288	5112	55	Cap 1
F _{enc}	5688	1512	27	5688	1512	27	Cap 1
F _{3canals}	18000	18000	100	18000	18000	100	Cap 1
I _c ^{mac} (Cau)	30	18	60	13	7	54	Cap 5
I _c ^{mac} (Als)	19	13	68	27	5	19	Cap 5
I _{sat} ^{mac} (Cau)	152	121	80	99	34	34	Cap 5
I _{sat} ^{mac} (Als)	93.5	72.5	78	166	29	17	Cap 5
I _{sat} ^{ftop}	70	55	78	70	55	78	Cap 4, 6
MfbPB	11.15	5.85	52	16.53	8.5956	52	Delgado 1986, PB
K _b	0.00274	0.00022	8	0.00274	0.00022	8	Cap 05
K _z	0.445	0.165	37	0.54	0.07	13	Cap 02
P _m ^{Cla}	48.5	21.5	44	27.3	12.012	44	Cap 04, PB
P _m (Cau)	5.5	3.75	68	7	0.8	11	Cap 05, PN
P _m (Als)	2.67	1.8	67	1.6	0.1	6	Cap 05, PN
R _{sed}	103.5	89.5	86	111	82	74	Cap 05
V _{vent}	5.55	4.75	86	2.15	1.15	53	Cap 04

però en canvi és molt superior si és té en compte només el més de setembre (Figura 6.7c,d), essent el flux pel canal de la sèquia del Ala (F_{ala}) el que té un major efecte respecte el flux de qualsevol de tots tres canals per separat. I si tenim en compte el rang natural de variació (Figura 6.10d), el flux d'entrada d'aigua dolça pels canals (que pot oscil·lar de l'ordre d'un 100%, en teoria, depenent de si estan bombant aigua o no) passa a ser el segon terme que més empitjora l'ajust entre l'OD estimat i l'OD observat (el segon terme que més modifica el valor absolut de la taxa de discrepància, és a dir, sigui per que l'estimat és molt superior a l'observat, o a l'inrevés). En aquest cas, augments dins el rang natural possible de F_{3canals} fan augmentar molt la diferència entre l'OD estimat i l'OD observat, només per darrera de R_{sed}, que en el seu cas, fa disminuir aquesta diferència.

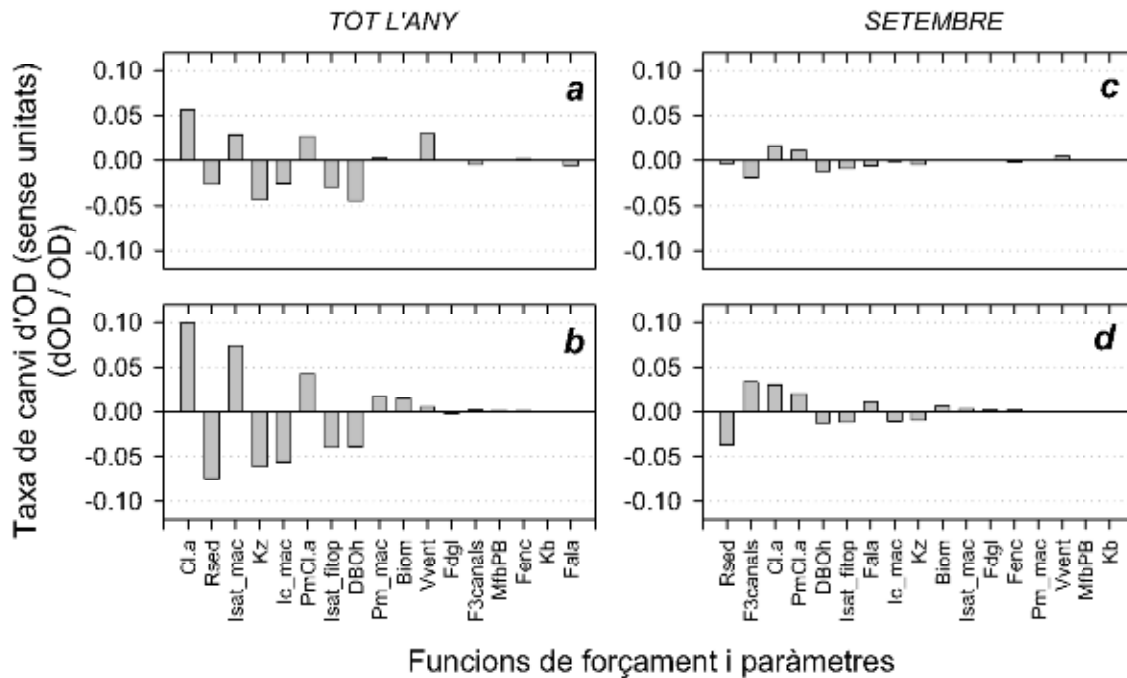


Figura 6.9. Taxa de canvi de l'oxigen dissolt en l'estació *Mig* fons de la badia dels Alfacs a causa de variacions en algunes funcions de forçament i paràmetres, dins el rang natural d'oscil·lació: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua.

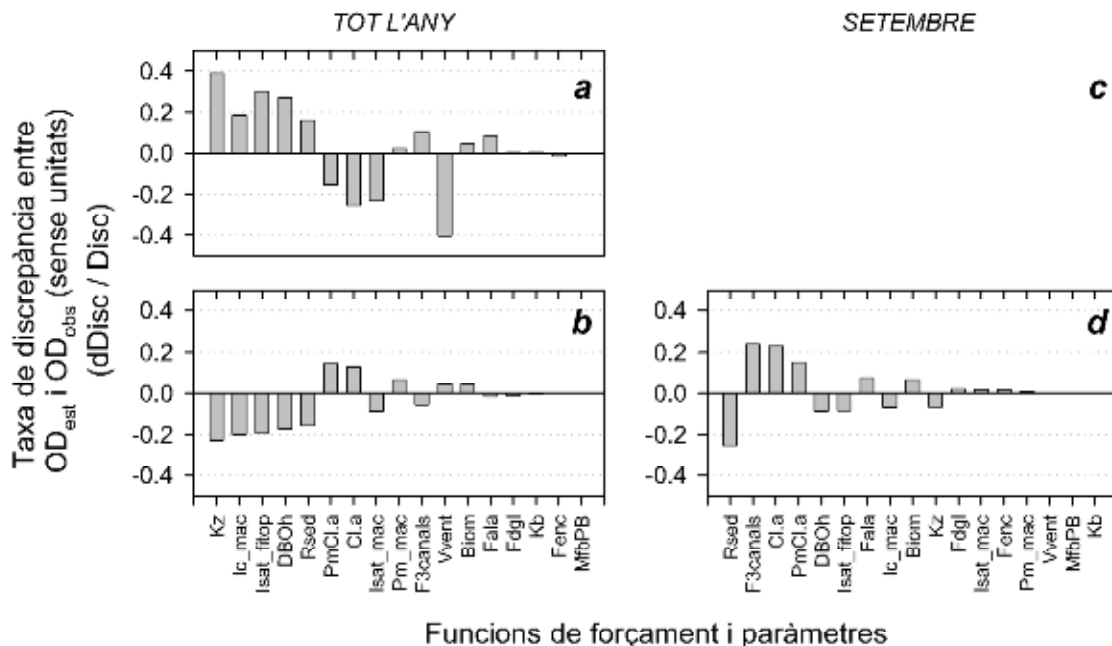


Figura 6.10. Taxa de discrepància entre OD_{est} i OD_{obs} per variació dels valors d'algunes funcions de forçament i paràmetres, dins el seu rang natural d'oscil·lació: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, inexistent per manca de dades (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. La raó per la qual no existeixen dades per dibuixar la figura (c) està explicada a la Figura 6.8.

Es rellevant, també, el fet que augments tant en la C_{la} , com en la $P_m^{C_{la}}$, impliquen taxes de discrepància negatives en la capa superficial (Figura 6.8a, Figura 6.10a; fan que disminueixi la diferència entre l'OD estimat i l'OD observat), però positives en la capa profunda (Figura 6.8b, Figura 6.10b), pel contrari, tant si es considera el 20 % de variació dels valors dels paràmetres (Figura 6.8) com el rang natural de variació (Figura 6.10).

Discussió

Ajust de les estimes d'OD als valors observats: capa del fons

L'ajust entre l'oxigen dissolt observat i l'estimat és bo la major part de l'any 1997 analitzat, si bé no és massa bo en alguns moments concrets del mateix any, i és lògic que hi hagi desajustos, donat el gran nombre de funcions considerades (Figura 6.2). Aquests desajustos no solen ser iguals en la capa del fons que en la capa superficial. (Figura 6.2).

En la capa del fons (Figura 6.2b), l'ajust va ser més bo els mesos en que els canals d'aigua es van trobar oberts que en els mesos en que els canals de rec i desguàs dels arrossars es van trobar tancats (els valors estimats són inferiors als observats en major grau que en la capa superficial). Això sembla indicar que els processos lligats a fluxos advectionis estan ben tipificats, en canvi, quan els fluxos advectionis són petits, podria haver-hi hagut una font d'oxigen que no hagués estat considerada; o bé, que algun procés de sortida d'oxigen hagués estat sobreestimat, o bé, algun procés d'entrada subestimat. En el cas de la possible subestimació de les fonts d'oxigen, aquest procés podria haver estat l'entrada d'oxigen per hidrodinamisme, tant advectioniu i d'intercanvi (difusiu) horitzontal com vertical, que a la seva vegada, podria haver estat relacionat (potencialment) amb el fet de no considerar en el model conceptual l'efecte d'ones estacionàries tipus "seques" o l'efecte d'ones internes de les quals es coneix la seva existència (Capítol 1, "Flux no advectioniu i disminució o acabament del procés hipòxic").

La causa d'aquest desajust per dèficit d'oxigen estimat en la capa del fons podria haver estat, també, una subestimació dels fluxos reals d'aigua dolça entrats a la badia (via canals i/o aigua freàtica) durant aquests mesos de novembre a març (Figura 2.12a; que haguessin suposat entrades netes d'oxigen). Sobre aquesta darrera hipòtesi, cal recordar una evidència ressaltada als resultats que la reforça: quan augmenta el flux d'entrada d'aigua dolça pels canals ($F_{3\text{canals}}$), disminueix, en general, la discrepància entre els valors observats i estimats; és a dir, l'ajust a l'oxigen que hi havia realment és més bo (veure el final de l'apartat Sensibilitat i discrepància).

Els desajustos per excés d'oxigen estimat en la capa de fons es van donar a l'inici de la primavera, a finals de juny, i durant el mes d'agost (Figura 6.2b). El de primavera sembla ser conseqüència de l'excés de pujada de concentració d'oxigen dissolt que estima el model per als mesos previs, a la vegada influenciat, probablement, per uns valors d'extinció de la llum de la columna d'aigua que no recullen tota la variabilitat que es devia donar a la badia. El gener de 1997 no es va realitzar mostreig d'irradiància i durant el mostreig de febrer es va espatllar el motor de la barca, raó per la qual es va agafar el valor d'extinció de la llum a la columna d'aigua per a febrer de 1998, tot i ser molt elevat a causa d'un bloom de dinoflagelats. El desajust de finals de juny correspon a un fenomen de molt curta durada detectat a la badia en que l'oxigen dissolt va baixar per sota del 70% de saturació al punt mig de la badia (Figura 2.12c), posteriorment a algunes setmanes de juny en que la salinitat de la capa de

fons va pujar per sobre de 36, arribant a valors superiors a 37 psu (Figura 2.12a) sense vents apreciables (Figura 2.11c). Per últim, el desajust per excés d'oxigen estimat el mes d'agost de 1997 (Figura 6.2b) pot ser explicat fàcilment de nou per dos factors: per que la concentració de clorofil·la a considerada a l'agost (obtinguda a partir de la mitjana de la sèrie de valors de 1990 a 1995) és quatre vegades superior que la del més anterior (mesurada a la badia el 1997), i per que els valors emprats d'extinció de la llum a la columna d'aigua tampoc no provenen de mostreig de camp sinó del valor de la interpolació lineal entre els valors dels mesos adjacents; aquesta discrepància sembla indicar que la terbolesa de la columna d'aigua podria no haver pujat de manera progressiva des de juliol fins a setembre de 1997 sinó que ho podria haver fet de manera més brusca o a polsos ja des de principis d'agost.

Ajust en la capa superficial

Pel que fa a la capa superficial, l'ajust sembla força més bo, tret del cas puntual d'octubre-novembre, amb dèficit en l'oxigen dissolt estimat respecte l'observat, i el contrari, per als casos puntuals de gener, i d'agost i setembre (Figura 6.2a).

En el cas del dèficit d'octubre-novembre, la raó més versemblant és de nou la manca de valors reals de camp per a l'extinció de la columna d'aigua. El darrer valor mesurat el 1997 va ser del 9 d'octubre de 1997, i es va aplicar el mateix valor alt a les altres setmanes del mateix mes, que va provocar que la simulació estimés que hi hauria d'haver hagut menys oxigen dissolt a la columna d'aigua que el que es va observar.

La causa més plausible de l'estimació en excés de concentració d'oxigen dissolt al gener rau en que no es va poder mesurar la concentració de clorofil·la a aquell mes i es va agafar, en el seu defecte, la mitjana de concentració de clorofil·la a durant el període de 1990 a 1995, i que el mes de gener solen haver-hi altes concentracions de dinoflagelats en la columna d'aigua (i per tant les concentracions mitjanes de clorofil·la a poden ser de fins a 5 vegades superiors a les mitjanes d'altres mesos).

Respecte al desajust de finals d'estiu, la causa sembla ser, de nou, relacionada amb una sobreestimació de la producció fotosintètica estimada per al fitoplàncton en aquest moment de l'any més que no pas amb una subestimació de la respiració de la columna d'aigua, que sembla del mateix ordre de magnitud que en altres badies (Sampou i Kemp 1994, Fourqurean *et al.* 1997). A més, existeix una major sensibilitat potencial de l'oxigen dissolt a la producció primària del plàncton que a la seva respiració (Figura 6.7, Figura 6.8, Figura 6.9, Figura 6.10). El cas específic entre finals de setembre i inicis d'octubre de 1997 s'analitza en més detall tot seguit.

El cas específic de finals de setembre

En aquests models conceptuals senzills com el que hem utilitzat es treballa integrant situacions en intervals de temps i espai considerables, i per tant, serveixen poc per explicar situacions concretes

que s'aparten de la norma, que solen ser la majoria en ecosistemes naturals. Així, es fa un intent d'interpretar per a finals de setembre de 1997 les causes dels desajustos entre els valors observats i esperats, que tot i les limitacions de precisió, ens donaran una idea d'altres processos ecològics importants que s'han de tenir en compte a la badia dels Alfacs.

La producció del fitoplàncton i les entrades d'oxigen a la capa de fons a través de l'hidrodinamisme (Figura 6.6f) van permetre que la concentració d'oxigen dissolt es mantingués relativament estable en la simulació també a la capa inferior (Figura 6.6a). Les estimacions per al mes d'octubre, de fet, es van correspondre molt més al que seria d'esperar que haguéssim trobat en mesos anteriors (agost o setembre): l'oxigen va manifestar una davallada neta diària (Figura 6.6a), agreujada pels temporals amb núvols que van reduir la radiació solar (Figura 6.6b). Les estimes de producció neta fitoplanctònica de la capa superficial es van reduir considerablement respecte al mes anterior, essent aquesta variable ecològica la que es va modificar més substancialment entre ambdós mesos (Figura 6.6g, h vs. Figura 6.6e, f, respectivament). De fet, aquest canvi en l'estima de producció neta fitoplanctònica va ser causat per la concentració de Cla, i no pas per les productivitats de la Cla considerades (que no van variar entre els dos mesos).

Les mitjanes de concentració de Cla agafades per a les estimacions corresponents a setembre van ser de 4.98 i 4.48 mg m⁻³ (superfície i fons, respectivament), mentre que, per a octubre, van ser de 2.05 i 2.99 mg m⁻³ (superfície i fons, respectivament), i aquests valors corresponen a les mitjanes dels valors trobats *in situ* a les diferents estacions de la badia entre 1990 i 1996. Així, la sobreestimació de la concentració de l'OD a setembre pot ser deguda a una sobreestimació de la clorofil·la a fotosintèticament activa (en la línia de l'exposat a la discussió d'un capítol previ, plana 186, que concorda amb els resultats obtinguts aquí). S'ha mostrat en aquest capítol que Cla és una de les variables ecològiques a les qual l'oxigen dissolt de la badia dels Alfacs és més sensible (Figura 6.7c, d), i a l'hora, una variable que com més augmenta en les simulacions, a l'igual que la productivitat de la Cla, més fa que s'allunyi l'oxigen dissolt estimat de l'observat en la capa profunda (Figura 6.8b, d). Això fa pensar que, en realitat, o bé hi havia menys clorofil·la a que la considerada en els càlculs, o aquesta es trobava fotosintèticament menys activa (amb menor P_m^{Cla}). I a la capa superficial passa el contrari (Figura 6.8a, Figura 6.10a), el que indica que podria haver menys fitoplàncton detrític acumulat en aquesta capa, en general al llarg de l'any, que en la capa inferior. De fet, aquesta possible clorofil·la a fortament detrítica de la capa inferior, podria procedir de l'acumulació de restes de poblacions fitoplanctòniques que haguessin deixat de ser actives, de procedència autòctona o al·lòctona a través dels canals de desguàs dels arrossars i llacunes costaneres (que en aquests mesos també mostren abundants poblacions fitoplanctòniques d'aigua dolça o salabroses). Es desconeix amb exactitud quina proporció de Cla pot ser detrítica, o en qualsevol cas, fotosintèticament inactiva, però es pot fer alguna estimació a partir del balanç d'oxigen descrit per a la badia dels Alfacs, atès que la quantitat de Cla detrítica pot ser molt important a finals d'estiu – inicis de tardor, i podria explicar les altes concentracions trobades freqüentment durant aquests mesos (Taula 2.12), malgrat les davallades de concentració d'OD observades (Figura 2.8c).

En aquesta línia, podem "preguntar-li" al model quina hauria de ser la concentració (o el percentatge) de clorofil·la a fotosintèticament activa per tal de minimitzar les discrepàncies entre l'oxigen dissolt observat i l'estimat en la situació de setembre. O el que és el mateix, podríem calibrar el model modificant la concentració de clorofil·la a de les simulacions, per exemple. Ara bé, les anàlisis de sensibilitat suggereixen incloure també en la calibració, com a mínim, els altres dos paràmetres que han mostrat una major capacitat de disminuir les discrepàncies, dins el rang natural de variació de setembre. Aquests són la respiració del sediment i els fluxos d'aigua dolça, que són els generadors de l'hidrodinamisme (Figura 6.10d). Les discrepàncies es fan mínimes quan la respiració del sediment es multiplica per 1.84, la concentració de Clorofil·la a es multiplica per 0.16 i els fluxos dels canals en conjunt es multipliquen per 1.26 (Figura 6.11). També s'ha efectuat la mateixa anàlisi de calibració però sense modificar el flux d'aigua dolça dels canals, i l'ajust ha estat pràcticament el mateix de la figura d'abans, amb la nova combinació de paràmetres calibrats de $r_{sed} \cdot 1.67$ i $Cl.a \cdot 0.21$. És a dir, si la respiració del sediment de l'estació de *Mig*, com a mínim, fos lleugerament superior al valor calculat (menys del doble, valor totalment raonable veient el grau de variabilitat de les mesures i estimes (0), i la clorofil·la a fos fotosintèticament activa només en prop d'un 20%, ja s'explicaria el balanç local negatiu amb precisió mesurat durant el període hipòxic. A més, un altre procés que sabem que succeeix i no ha estat incorporat en el model, és el consum d'oxigen generat per la descomposició de les macroalgues mortes. Williams (1984) va deixar descompondre *Caulerpa cupressoides* en borses, i en 7 dies s'havia perdut el 50% del pes fresc inicial. A l'estiu, que les produccions són altes (Figura 6.3d, e, f), però en canvi no s'acumula biomassa algal (Figura 5.6) ha d'haver, o herbivoria (que no és gaire abundant, en cas de donar-se, per les toxines que porten associades), o més probablement, descomposició de biomassa i remineralització o exportació (cap a mar obert o cap al sediment). Sobre espècies del gènere *Alsidium*, no hi ha dades publicades, però com a referència, *Gracilaria tikvahiae* pot descompondre's totalment en tres setmanes en ser enterrada en borses de malla (Peckol i Rivers 1996), i el temps de semidescomposició d'altres espècies de macroalgues, a les plataformes someres de la badia dels Alfacs, es troba entre 11 i 23 dies (Martínez 1990). Per altra banda se sap que, en praderies de *Posidonia oceànica*, aproximadament la meitat de la biomassa morta genera consum d'oxigen. Es desconeix quin percentatge realment ho faria en el cas d'aquestes macroalgues, malgrat es pensa que podria ser un percentatge superior, en ser estructuralment més senzilles que les fanerògames marines. Seria raonable, doncs, que una part d'aquesta pujada de l'ordre d'un 70% del consum bentònic necessari per ajustar el model, fos atribuïble parcialment a aquest consum no considerat de la descomposició de les macroalgues mortes.

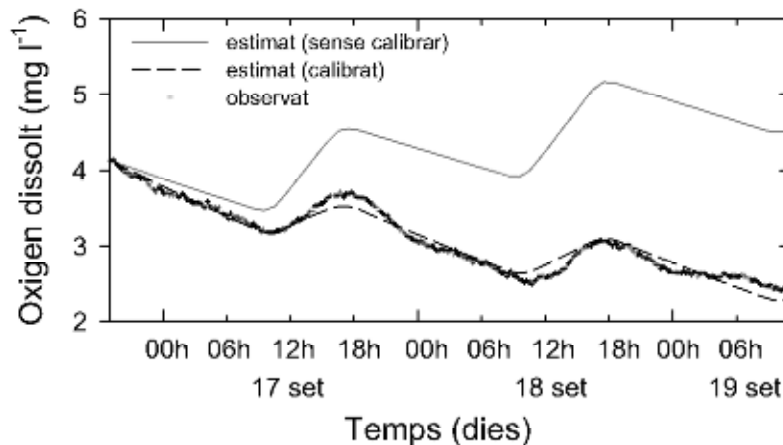


Figura 6.11. Concentració d'oxigen observada (creus) vs. estimada (linies) entre el 16 i 19 de setembre de 1997 en capa profunda de l'estació *Mig* de la badia dels Alfacs. Es mostra l'evolució estimada de l'OD sense calibrar expressament cap paràmetre respecte els valors emprats per a la simulació de tot l'any 1997 (línia grisa contínua), i amb els valors calibrats de respiració del sediment, concentració de clorofil·la a i fluxos d'aigua dolça ($r_{sed}^*1.84$, $Cl.a^*0.16$, $F3_{canals}^*1.26$). Resultat pràcticament idèntic s'obté calibrant per als dos paràmetres $r_{sed}^*1.67$ i $Cl.a^*0.21$ només (veure text per més detalls).

Evidentment, hi hauria altres combinacions dels paràmetres del model, numèricament possibles, que podrien millorar l'ajust (al menys, hipotèticament), però aquesta anàlisi inicial de calibració senzilla ens ha semblat la més raonable biològicament i física, a la llum de la sensibilitat del model i del coneixement de quins paràmetres poden tenir més grau d'error en la seva estimació prèvia. L'altre anàlisi de calibració ecològicament interessant seria la de saber quins haurien de ser els fluxos d'aigua dolça per maximitzar l'ajust (minimitzar les discrepàncies), ja que la variable "aports d'aigua dolça" és una de les menys conegudes amb precisió per situacions de mesos concrets com els de finals d'estiu, atès que en teoria els canals estan oberts, però també és el moment de l'any en que el riu Ebre porta menys cabal de tot l'any (Ibáñez *et al.* 2007). Malauradament no n'hi ha prou per ajustar el model amb modificacions únicament del cabal d'aigua dolça entrat (i per tant, de la circulació estuarina generada), per que la tendència de l'oxigen en el model per a aquells dies de setembre és la d'increment (Figura 2.12, Figura 6.6a). És a dir, malgrat es redueixi el flux hidrodinàmic fins a fer-lo zero, no canvia el signe del balanç local positiu d'oxigen, per que els aports d'oxigen per hidrodinamisme per si sols no són importants ni necessaris per mantenir equilibrat el balanç en aquesta situació.

En el cas de setembre, caldrà doncs per treballs futurs, comprovar la hipòtesi de la clorofil·la detrítica, i quantificar amb exactitud la seva proporció del total de clorofil·la mesurada, així com realitzar també experiments específics per reduir el grau d'error en les mesures de respiració del sediment per un costat, i de la descomposició de les macroalgues. I seria molt més adient mesurar directament la circulació d'aigua a la zona de les hipòxies de la badia, més que no pas, com ara, haver de fer estimacions indirectes amb alt grau d'incertesa sobre l'error comès en els fluxos d'aigua considerats.

Contribució relativa dels diferents elements de l'ecosistema en considerar tota la badia en conjunt

Observant la dinàmica anual de l'oxigen dissolt, el fitoplàncton s'ha mostrat amb un rol predominant a la producció d'oxigen de l'ecosistema, tot i l'ocupació tan extensa durant l'última dècada de les macroalgues bentòniques, que únicament són les productores més importants d'oxigen a la primavera (Taula 6.3). La respiració del sediment és generalment la principal destinació de l'oxigen de l'ecosistema, excepte a l'hivern, en que consumeix del mateix ordre de magnitud que els que ho fa la macroalga *Alsidium corallinum*. Així, el consum del sediment oscil·la entre tan sols el 12% a la primavera (quan hi ha prop d'un 60% de pèrdues – o sobre estimació dels guanys - per algun terme desconegut en el balanç), i de l'ordre de la meitat de totes les pèrdues d'oxigen de la columna d'aigua a l'estiu i tardor (mesos quan es més factible que esdevinguin les hipòxies), de manera similar al descrit per a altres badies (Hanes i Irvine 1968, Seiki *et al.* 1989, Kemp *et al.* 1992). Els factors físics de l'ecosistema que regulen l'oxigen dissolt de la columna d'aigua (intercanvi amb mar obert i amb l'atmosfera) s'han mostrat com a vies de sortida d'oxigen en les mitjanes diàries de les quatre estacions climatològiques. El terme desconegut del balanç, necessari per minimitzar les discrepàncies, representa només vora un 10% de les entrades d'oxigen en hivern i estiu, com a fonts no comptabilitzades (o pèrdues sobreestimades), i entre un 60 i un 20% de les sortides d'oxigen (o de sobreestimació de les entrades), en primavera i tardor, respectivament. Aquest terme desconegut es podria explicar a l'hivern per renovació d'oxigen a causa de processos físics (major circulació i turbulència d'aigua que la contemplada en el model), o sobreestimació de les respiracions bentòniques, com s'ha apuntat anteriorment. A la primavera, podria indicar una sobreestimació de la producció de les macroalgues bentòniques. A l'estiu, podria ser conseqüència d'una lleugera sobreestimació de la producció planctònica tant de la capa superficial com profunda a partir de principis d'agost, com s'ha explicat ja anteriorment (Figura 6.2a, b). O bé podria ser conseqüència d'una subestimació del consum d'oxigen associat a les macroalgues a causa de la descomposició del seu carboni orgànic¹⁹, en intervals de temps inferior a un mes, que va ser la freqüència de mostreig generalment aplicada en 1997, però que com s'ha exposat anteriorment, hi ha casos descrits a la literatura que citen descomposicions de macroalgues en intervals de temps inferiors. I a la tardor, podria ser fàcilment per una lleugera sobreestimació de la producció del fitoplàncton, per haver considerat tota la clorofil·la a mesurada com a fotosintèticament activa, quan el més probable, com s'ha exposat anteriorment, és que hi hagués una part important de clorofil·la detrítica a l'inici de la tardor.

Comparació dels balanços d'oxigen amb estudis previs

Camp *et al.* (1991) van elaborar un balanç preliminar d'oxigen dissolt per a tota la badia, incloent-hi la contribució de les plataformes someres. Les entrades d'oxigen considerades eren la producció local del fitoplàncton i microfitobentos, i a les plataformes someres, també la producció dels macròfits,

¹⁹ Aquest procés no ha estat considerat més enllà de ser comptabilitzat en la DBO de l'aigua i la respiració del sediment, tot i que es creu que la velocitat de descomposició de les macroalgues de la cubeta de la badia ha de ser inferior a la de les algues més palatables de les plataformes someres.

recorrent eventualment als aportes de mar obert i a l'intercanvi amb l'atmosfera quan era necessari quadrar el balanç. Les principals sortides d'oxigen eren el consum del sediment, i a les plataformes someres, també la respiració dels macròfits. Dels seus càlculs s'obtenia un balanç per al cos central de la badia de $0.55 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de dèficit, i per les plataformes nord i sud respectivament de 2.78 i $0.63 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de superàvit, en còmput mitjà anual. Val a dir que en els seus càlculs no es tenia en compte la respiració de la columna d'aigua per no disposar de prou dades fiables, i s'apuntava que devia ser inferior a $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. De fet, la DBO màxima absoluta mesurada en el transcurs d'aquesta tesi doctoral corrobora la consideració anterior, atès que ha estat de $0.92 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ al març de 1997 a l'estació *Cua fons*, i els valors màxims habituals, que es donaven al setembre, rares vegades van ser superiors a $0.7 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$.

Nosaltres vam trobar que, per al cos central de la badia, el dèficit d'oxigen mesurat *in situ* en una situació hipòxica concreta com l'observada en setembre de 1997, va ser de $0.60 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (a partir de les concentracions màximes d'OD del 17 i 18 de setembre, Figura 6.11). Ara bé, si el 1991 es xifrava el balanç biològic de la capa de fons en aproximadament $-0.55 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (o més negatiu, si s'hagués inclòs la DBO), els nostres resultats actuals el xifren en $+0.50 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (o bé $+0.325$ si es té en compte la DBO) per a finals dels anys 90. Recordem, però, que en la present tesi doctoral s'ha quantificat el "terme desconegut", que faria possible que l'ajust entre els valors de concentració d'oxigen dissolt estimats pel model i els valors observats al camp fos òptim. Aquest "terme desconegut" sempre és negatiu en el cas de la capa de fons (sobreestimació de les entrades, com per exemple, per l'existència d'una fracció de clorofil·la a fotosintèticament inactiva, o subestimació de les pèrdues, com per exemple, les que s'hi donarien per descomposició de les macroalgues). Així, en incorporar aquest "terme desconegut" tot tenint en compte la DBO, el balanç biològic de la capa de fons esdevé $-0.564 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de mitja anual, valor extraordinàriament semblant al de les estimacions fetes per Camp *et al.* (1991, tot i no haver considerat els mateixos processos. I quan, a més, tenim en compte els processos de la capa superficial (incloent l'intercanvi amb mar obert i amb l'atmosfera), el balanç net de tot l'ecosistema esdevé molt proper a zero ($< +0.01 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$), en còmput mitjà anual (a partir dels resultats anuals del BNE, Taula 6.3, per a 6 m de columna d'aigua).

Per altra banda, en els estudis previs a la badia dels Alfacs no s'havia quantificat de forma rigorosa l'intercanvi d'oxigen amb l'atmosfera, i com a molt, en el treball de Camp *et al.* (1991 es feia referència a un valor de difusió des de l'atmosfera de $3.5 \cdot 10^5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Hutchinson 1957) per a les plataformes someres, que podia satisfer l'elevada demanda d'oxigen estimada llavors per a la columna d'aigua somera ($4.3 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, en mig metre de fondària, aproximadament). Aquest valor podia ser cert i aplicable en aquell context, però és un valor extraordinàriament elevat per al cas de la columna d'aigua de 6 m de fondària de la cubeta de la badia, si el comparem amb les mesures habituals inferiors als $0.004 \cdot 10^5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ tant de sortida com d'entrada d'oxigen (fent les conversions adequades a partir dels resultats mostrats a la Figura 6.4f-h). Només en casos de temporals forts de vent com els apareguts a octubre (Figura 6.4a, b), el flux de difusió d'oxigen cap a la columna d'aigua es podria fer de l'ordre de $0.03 \cdot 10^5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ d'entrada, corresponents als

vents de 8 m s⁻¹ de mitjana diària (Figura 6.6c). A partir dels resultats d'aquesta tesi es pot afirmar que, en terme mig anual, el vent s'encarrega d'exportar una quantitat d'oxigen diària equivalent a prop de la meitat de la producció neta del fitoplàncton de la capa superficial de la major part de la badia (Figura 6.5m, o). I si el vent juga un paper crucial com a equilibrador de la concentració d'OD a la capa superficial de la columna d'aigua, l'hidrodinamisme juga el paper anàleg a la capa profunda, aportant oxigen quan el balanç net local és negatiu (Figura 6.5r), i exportant-ne quan és positiu (Figura 6.5m, n, o, q).

Tanmateix, els estudis previs no havien analitzat els termes de producció fotosintètica de macròfits marins en el balanç d'oxigen dissolt del cos central de la badia (per no existir-ne aquests poblaments, Capítol 5), però sí que ho havien estat els marges laterals de la badia. Martínez (1990) va analitzar les contribucions relatives dels diferents productors primaris que hi existien (dades dels anys 80). La producció primària de la comunitat d'algues de les plataformes someres oscil·lava entre 0.4 i 2 g C m⁻² d⁻¹ (el que equival a 1.1 i 5.3 g O₂ m⁻² d⁻¹, considerant el quocient fotosintètic igual a 1). Això significava el 7% de la producció primària total, front el 60% del fitoplàncton, el 18% de les fanerògames i el 15% del microfitobentos. En el seu mateix treball, s'atribueix a les macroalgues el fet de ser una font de carboni ràpidament disponible per als cicles interns de la badia. En canvi, el cas actual de les macroalgues del fons de la badia és lleugerament diferent per diverses raons. Les dues espècies que majoritàriament colonitzen en l'actualitat el fons del cos central de la badia (*Caulerpa prolifera* i *Alsidium corallinum*) no representen carboni orgànic fàcilment assimilable pels consumidors de l'ecosistema, a causa de que contenen toxines que poden afectar els seus consumidors i descomponedors (Capítol 5, plana 201). Les macroalgues a les que es feia referència anteriorment (dels gèneres *Ulva*, *Chaetomorpha*, *Cladophora* i *Gracillaria*, entre altres), per contra, són altament palatables. L'única espècie comparable que hi és present actualment al fons de la badia és *Gracillaria verrucosa*, malgrat només s'hi troba de forma ocasional, i generalment, és poc abundant. Per altra banda, al fons de la badia no hi ha fanerògames marines, fet que contrasta amb la gran abundància de *Cymodocea nodosa* a les plataformes someres de la badia (Pérez *et al.* in press). A més, abans les macroalgues bentòniques no ocupaven el cos central de la badia, i el seu principal productor primari era el microfitobentos, que generava produccions de l'ordre d'entre 7.5 i 16.5 mgO₂ m⁻² h⁻¹ (Delgado 1986), i ara en terme mig les produccions netes màximes del bentos són un ordre de magnitud superior (a partir de Figura 6.5, per 6 m de columna d'aigua). En aquesta nova situació, el microfitobentos només s'hauria de tenir en compte en la mesura que hi creixés sobre les macroalgues bentòniques, atès que aquestes ocupen la pràctica totalitat de la superfície del sediment. Però, tot i així, es creu que la seva contribució seria mínima comparada amb la de les macroalgues.

Comparació de les contribucions d'oxigen amb les d'altres badies

Altres badies estratificades on no hi han gaires macròfits bentònics mostren una forta dependència dels processos físics per compensar les eventuals davallades d'oxigen de la capa d'aigua fonda. Així, la badia d'Uranouchi, Japó (plana 330), veu reduït a l'estiu el seu transport d'oxigen per barreja vertical cap a les masses hipòxiques del fons, passant del 20-45% a primavera i tardor, al 7% a l'estiu (Munekage 1992), de manera similar a la que s'ha descrit en altres badies arreu del món (Barnes i

Collias 1958, Officer *et al.* 1984, Turner *et al.* 1987, Seliger i Boggs 1988, Katsuyuki i Satoru 1997). A la badia dels Alfacs, no es disposa del valor separat entre advecció horitzontal i difusió turbulenta o intercanvi vertical, però el valor conjunt d'intercanvi per hidrodinamisme, respecte els valors de la badia japonesa mostrats anteriorment, és inferior a la primavera i molt superior a l'estiu (9 % i 17%, respectivament; Taula 6.3), i s'ha descrit anteriorment que, de vegades, l'intercanvi per barreja vertical ha contribuït notablement per reduir o eliminar la hipòxia (Capítol 3, plana 143 i ss.). Així mateix, Camp *et al.* (1991) proposaven també que era l'hidrodinamisme fonamentalment el que compensava el dèficit de $0.55 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ del balanç d'oxigen dissolt de la capa inferior de la badia d'Alfacs a principis de la dècada dels anys 90.

Seguint amb la mateixa comparació de badies, el fitoplàncton de la badia d'Uranouchi passa de contribuir amb el 80% de les entrades d'oxigen al sistema durant la primavera i tardor, a tan sols amb el 25% a l'estiu, essent prop del 50% restant, entrades d'oxigen a causa de l'intercanvi mareal (Munekage 1992). A la badia dels Alfacs, en canvi, l'intercanvi mareal és insignificant (plana 22), i el fitoplàncton a l'estiu és responsable de més de la meitat de les entrades d'oxigen, essent molt superior la seva contribució relativa durant la resta de l'any excepte a la primavera, quan només ho és un 38%, a causa de les grans produccions de la macroalgues bentòniques (Taula 6.3).

A part de la barreja vertical i la producció biològica autòctona (del plàncton o bentos), hi ha altres processos que alleugereixen l'estrès d'oxigen en els mesos crítics. Entre aquests hi ha l'entrada neta d'aigua fonda de mar obert, que s'ha descrit ocasionalment a la badia dels Alfacs (Capítol 3, final de la secció de la plana 142, i per al cas de la hipòxia de l'any 1991, plana 146 i ss.), i que s'ha descrit també en altres badies (Weigelt 1990, Munekage 1995, Katsuyuki i Satoru 1997), fiords (Stigebrandt 2001), o fins i tot en sistemes molt més grans com el Golf de Cariaco a Veneçuela (Gade 1961) o el Mar Bàltic (Schinke i Matthaus 1998).

Un altre procés físic important, l'intercanvi d'oxigen amb l'atmosfera, s'ha descrit a la badia d'Uranouchi com a responsable d'entre el 50 i el 80% de les sortides d'oxigen de la capa superficial del sistema entre primavera i la tardor (Munekage 1992). A la badia dels Alfacs, aquest percentatge no és tan gran com a la badia japonesa, probablement a causa, en part, de l'acció del monsons, sinó que es situa entre el 10% i el 31 % de les sortides d'oxigen, en terme mig per a tardor i hivern, respectivament (Taula 6.3). Altres badies, com la de Chesapeake, també tenen descrites exportacions d'oxigen cap a l'atmosfera la major part de l'any. Kemp *et al.* (1992), en un estudi concret per als mesos entre Març i Octubre amb dades disperses de 1986 i 1987, van mostrar que el flux d'oxigen cap a l'atmosfera podia representar entre el 60% de les sortides d'oxigen a primavera i com a màxim el 100% en agost, mentre que en juny que s'havia invertit el flux i havia passat a significar el 45% de les entrades netes d'oxigen. De totes formes, en la majoria de sistemes costaners, el balanç anual d'intercanvi d'oxigen amb l'atmosfera es pot considerar d'exportació neta cap a l'aire. En sistemes marins de caire més oceànic, però, el balanç anual pot resultar en una

importació d'oxigen cap a la columna d'aigua, com s'ha descrit per al corrent de l'Atlàntic Nord davant les costes noruegues (Skjelvan *et al.* 2001).

Altres estudis s'han centrat més en la contribució dels diferents organismes fotosintètics al balanç d'oxigen de l'ecosistema, sense analitzar en detall la contribució dels processos físics. En alguns sistemes, com el cas del Mar de Wadden per exemple, s'ha descrit que el microfítobentos arriba a ser responsable de la meitat del balanç, mentre el fitoplàncton ho és de l'altre meitat (Cadée i Hegeman 1974). I a la badia de North Inlet (Carolina del Sud, E.U.A.) es va descriure que el major productor era el microfítobentos (36%), seguit de la comunitat marginal d'*Spartina* (32%), el fitoplàncton (18%) i per últim les macroalgues (14%; Pinckney 1994). En canvi, a la llacuna estuària de Langebaan, a Sud-àfrica, els macròfits han estat identificats com a responsables del 55% del balanç d'oxigen dissolt, essent més minoritària la contribució del fitoplàncton, amb un 23%, i del microfítobentos, amb un 22% (Fielding *et al.* 1988). A Alfacs, en canvi, el fitoplàncton predomina amb un 70% de les entrades del balanç d'oxigen en còmput anual, mentre que a les macroalgues bentòniques en conjunt només se les atribueix un 31% (Taula 6.3, tot i les diferències notables entre estacions climatològiques), essent el microfítobentos important únicament en els indrets en que les macroalgues no cobreixen tot el sediment, com passa a l'estació boca.

Així, d'aquesta anàlisi comparativa s'extreu que a la badia dels Alfacs, la manca d'entrada d'oxigen per renovació d'aigua a causa de les mareas es veu substituïda per l'intercanvi amb l'atmosfera mediat pel vent i pels termes advection i difusius de l'hidrodinamisme de la badia, incloent de vegades la barreja vertical o l'entrada d'aigua de mar obert pel fons, tot fent minvar o desaparèixer la hipòxia de la capa de fons, com passa amb altres badies o sistemes costaners d'arreu del món. La badia és una exportadora neta d'oxigen al llarg de l'any (fonamentalment el produït pel fitoplàncton, i en menor mesura, per les macroalgues bentòniques), cap a l'atmosfera i mar obert. Previsiblement, hi ha també una exportació de carboni orgànic tant cap a mar obert com acumulat al sediment. En els mesos i zones en que apareixen les hipòxies, el plàncton continua produint entrades netes d'oxigen a la badia dels Alfacs, mentre que les macroalgues presents esdevenen consumidores netes en el balanç (Figura 6.6).

Síntesi de la dinàmica anual de l'oxigen dissolt

Després de tots els resultats mostrats sobre l'oxigen dissolt, i les discussions dels capítols previs, pot ser interessant fer un esforç de síntesi per descriure el patró anual general de l'oxigen dissolt de la badia dels Alfacs.

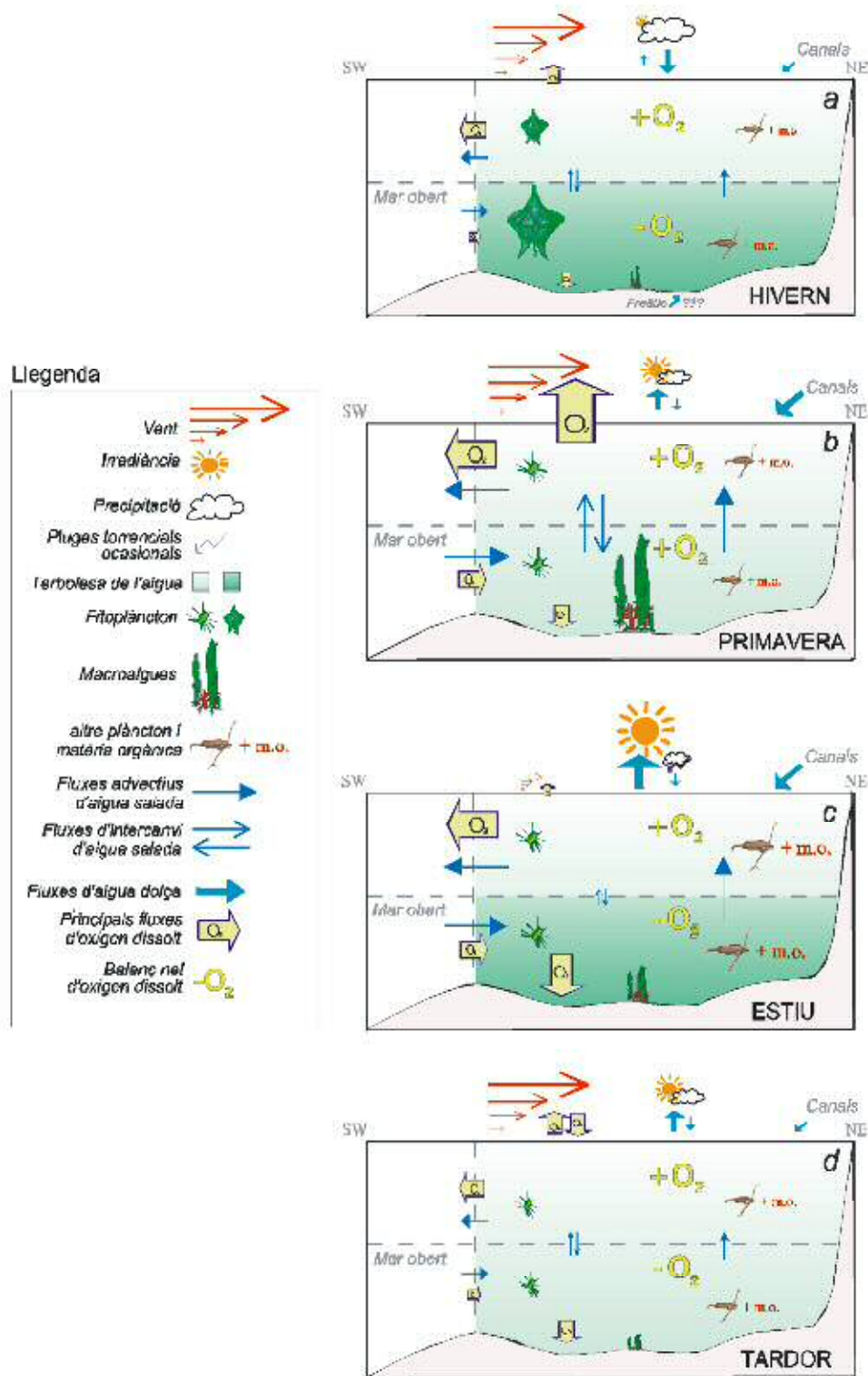


Figura 6.12. Esquema de la dinàmica anual d'oxigen dissolt a la badia dels Alfacs: (a) hivern, (b) primavera, (c) estiu, i (d) tardor. La mida dels símbols és arbitràriament proporcional a la seva magnitud, o a la contribució al balanç d'oxigen dissolt. Els símbols representats per al plàncton no tenen per què coincidir amb cap espècie concreta del grup taxonòmic general al que representen. Veure text per més detalls.

A l'hivern (Figura 6.12a), existeixen blooms puntuals de dinoflagelats i els productors primaris bentònics tenen respiracions superiors a la seva producció neta en terme mig. Els fluxos d'aigua advectionis i d'intercanvi (difusius) són baixos. A la primavera (Figura 6.12b) comença l'època de cultiu

de l'arròs i per tant el desguàs d'aigua dels seus camps de cultiu cap a la badia dels Alfacs. L'aigua encara és prou transparent (la seva K_z , la variable ecològica a la que l'oxigen dissolt és més sensible, mostra valors propers a 0.3 m^{-1}). La temperatura i la radiació solar van augmentant, amb el que la producció fotosintètica de les macroalgues bentòniques augmenta considerablement així com la seva biomassa; aquestes variables mostren els seus valors màxims anuals per les dues espècies en aquesta època. La producció neta d'oxigen no es manté en l'ecosistema sinó que és exportada cap a l'exterior (aire i mar obert). A l'estiu (Figura 6.12c) es comença a fer notable la progressiva davallada de la transparència de l'aigua, que provoca que la K_z augmenti fins a valors propers a 0.6 m^{-1} . La progressiva disminució de la llum incident que fa baixar les produccions netes, acompanyada d'altres temperatures que fan augmentar les velocitats respiratòries dels organismes, produeixen una progressiva disminució dels excedents d'oxigen dissolt de la columna d'aigua. A finals d'estiu i inici de tardor, aquestes condicions s'agreugen el màxim, esdevenint el compartiment bentònic un consumidor net d'oxigen, que en cas de mantenir les mateixes condicions ecològiques prou temps, provocaria que les seves aigües esdevinguessin hipòxiques o fins i tot anòxiques. Un cop entrada la tardor (Figura 6.12d), les hipòxies desapareixen en paral·lel a una reducció de la terbolesa de la columna d'aigua, la tornada de fronts de vent que ajuden a produir barreja o intercanvi vertical de masses d'aigua. Mesos més tard, disminueix la circulació bicapa en reduir-se de nou les entrades d'aigua dolça a la badia (tancada dels canals de desguàs), però el balanç d'oxigen ja no és tan negatiu i la temperatura disminueix progressivament.

La situació de dèficit d'oxigen dissolt de finals d'estiu es pot evitar o aturar si existeix prou renovació de l'aigua fonda (sigui per major circulació provenint de mar obert o per major intercanvi vertical amb l'aigua superficial), tal i com ja s'ha citat anteriorment en aquest mateix capítol. La primera de les situacions comporta, a demés i de forma paral·lela, una disminució de la terbolesa de l'aigua. La segona situació, si fos produïda per una major entrada sostinguda d'aigua dolça, podria fer augmentar inicialment la terbolesa (per les partícules i nutrients encara presents als canals de desguàs), però a mig termini també actuaria en direcció a millorar la transparència de l'aigua a causa de la circulació general d'estuari positiu que se sap que genera. Si aquesta segona situació fos produïda per un augment del vent, es preveu que la terbolesa de l'aigua no es veuria massa disminuïda, i podria fins i tot augmentar per resuspensió de partícules del fons i possible transport associat de partícules de les plataformes someres cap al cos central d'aigua de la badia. Si aquest augment de la velocitat del vent es mantingués de forma sostinguda en valors alts, llavors el vent acabaria barrejant la capa d'aigua fonda amb l'aigua més superficial, i el fenomen hipòxic es finalitzaria (al menys, mentre durés l'acció del vent). Ara bé, els vents solen ser baixos a l'estiu fins entrada la tardor, i si coincideixen els factors anomenats anteriorment amb l'absència de vents forts, el fenomen hipòxic es podrà produir. Val a dir que qualsevol condició que faci disminuir la taxa de renovació de l'aigua fonda farà augmentar el risc i la velocitat d'aparició de les davallades d'oxigen. En la mateixa línia actuen les acumulacions d'aigua salada (i per tant, més densa) observades en algunes setmanes concretes d'aquesta època de l'any crítica, com va ser la setmana del 17 de setembre de 1997 (Figura 3.3).

Estat tròfic

L'ecosistema de la badia dels Alfacs va mostrar un balanç net força compensat en termes generals l'any 1997, segons indica el BNE de $+26.5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Taula 6.3, tenint en compte tant les comunitats biològiques com els fluxos a causa dels factors abiòtics per a tota la columna d'aigua). Els organismes de l'ecosistema mostren un balanç lleugerament autotròfic en conjunt, tal i com s'observa per l'índex PB:R d'1.4 per al plàncton i el bentos a l'hora, tot i que és marcadament autotròfic per al plàncton i força compensat per al bentos en còmput anual (Taula 6.4). Només el compartiment bentònic de l'estació *Cua* pot ser considerat lleugerament heterotròfic, en valors acumulats anuals (PB:R = 0.8), conclusió que coincideix amb el què s'havia obtingut a partir de la situació ecològica de la badia prèvia a la colonització de les macroalgues bentòniques (Camp *et al.* 1991).

El balanç de producció neta biològica de la badia dels Alfacs, amb valors de $336 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ per al plàncton o pràcticament nuls per al bentos ($-10 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, a partir de Taula 6.3), es troba dins l'ordre de magnitud de balanços que són freqüents a llarg termini tant en sistemes dominats pel plàncton ($100\text{-}1000 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) com en sistemes dominats per productors primaris bentònics ($100\text{-}3000 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, LOICZ 2000). De totes formes, són abundants els treballs que citen produccions primàries dels sistemes marins costaners entre 100 i $400 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ (Figura 6.13b), la major part de la qual es pot atribuir a producció fitoplanctònica (Figura 6.13a), tot i la gran heterogeneïtat que pot haver en alguns d'aquests sistemes. Per aquesta raó, cal tenir present que el balanç d'oxigen pot variar notablement en funció de l'àrea de mostreig escollida en casos de badies heterogènies, com ha passat amb alguns resultats de la badia dels Alfacs (Taula 5.4, Taula 6.4, ...), o en sistemes de major mida, com la badia de Chesapeake (plana 322), amb valors de producció biològica entre els $100 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ a les parts baixes i al voltant de 0 ó $-87 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ a les parts altes (Kemp *et al.* 1993, D'Avanzo *et al.* 1996, Kemp *et al.* 1997). A més, les plataformes someres de la badia dels Alfacs, que no estan incloses en el balanç, el podrien modificar lleugerament. És possible que una gran part de la seva producció d'oxigen s'exporti a l'atmosfera, en forma de bombolles d'oxigen, i el seu carboni (al menys el produït per la fanerògama marina *Cymodocea nodosa*) s'acumuli al sediment com a compostos refractaris, s'exporti cap a fora de la badia o s'acumuli en forma de fullaraca a les seves vores (Mateo *et al.* 2003).

Sobre l'exportació de la producció autòctona, cal remarcar que tot l'oxigen alliberat a l'atmosfera ($796 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ de mitjana anual, Taula 6.3) ha de comportar una quantitat proporcional de carboni fixat que també s'ha d'exportar, un cop tret la petita part que s'acumulés en forma d'increment de biomassa, en cas que augmentés la cobertura algal. Però com es creu que, a llarg termini, els increments de biomassa són menyspreables (estabilització de les poblacions biològiques), els excedents de producció s'han d'exportar, majoritàriament, entre mar obert, el sediment i l'extracció pesquera i mariscadora de la badia (musclos, cloïsses, ...). Aquest oxigen exportat a l'atmosfera

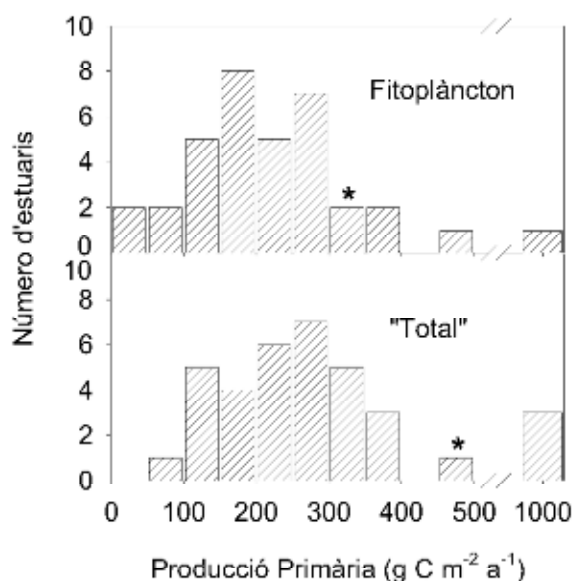


Figura 6.13. Distribució de freqüències de producció primària particulada per (a) fitoplàncton, i per (b) fitoplàncton més fanerògames, macroalgues i microfítobentos, en varies llacunes, estuaris i aigües costaneres. Modificat de Nixon (1986). S'ha inclòs l'asterisc (" * ") sobre la classe de freqüència on es situa la producció de la Badia dels Alfacs.

representa necessàriament una exportació paral·lela de carboni de l'ordre de $110 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. L'exportació neta de carboni cap a mar obert és de l'ordre de $30 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, calculada a partir de la diferència entre les entrades mesurades de carboni orgànic dissolt més particulat per la capa de fons de la badia (COD + COP, dades no mostrades, corresponents a l'estació *Exterior*) menys les sortides per la capa superficial al llarg de l'any. El carboni extret per l'activitat muscular és uns dos ordres de magnitud inferior²⁰, raó per la qual es pot ignorar en el balanç. La resta, $80 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, és la quantitat de carboni exportat que versemblantment s'acumula en el sediment.

Altres estudis de producció, que separen també part atribuïble al bentos, mostren balanços productius similars en part als mostrats aquí, llevat que són pocs els que tenen una contribució neta del bentos pràcticament nul·la, com en el cas de la badia dels Alfacs (Figura 6.14). La badia Waquoit, de la costa est de Massachusetts (EUA), és un sistema micromareal dominat pel bentos, amb fondàries mitjana i màxima de 1.1 i 3 m respectivament, que rep una elevada càrrega de nutrients a través del riu Childs. La producció biològica en el balanç és només de $70 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, malgrat la presència de fanerògames marines i macroalgues bentòniques abundants (D'Avanzo *et al.* 1996). La badia de Tomales, relativament comparable a la badia dels Alfacs en la mida, clima i marees petites (plana 324) és heterotròfica (Dollar *et al.* 1991), amb menor producció que la de la badia dels Alfacs. Un 70% dels

²⁰ Tradicionalment es cita 4000 Tm com a valor de producció anual de musclo de la Badia dels Alfacs (J. Camp, *com. pers.*), probablement a partir de Arnal (1980). Suposant les relacions d'un 10% de matèria orgànica respecte el pes total de musclo, un 20% de Pes Sec respecte el Pes Fresc de la part orgànica, un 50% de Carboni respecte el PS, i entre 32 i $44 \cdot 10^6 \text{ m}^2$ de superfície de la badia (àrea basal o àrea superficial, respectivament), l'exportació de carboni a través de l'extracció de musclos és de l'ordre d' $1 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, dos ordres de magnitud per sota del BNE, i també dos ordres de magnitud inferior al total del carboni exportat de la Badia dels Alfacs.

guanys i el 40% de les pèrdues de l'ecosistema ocorren en la columna d'aigua (Smith i Hollibaugh 1997), amb una respiració mitjana de $0.54 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$ (Fourqurean *et al.* 1997), mentre que per la badia dels Alfacs, com a referència, és inferior ($0.38 \pm 0.03 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$, $n=48$, dades no publicades), i el plàncton, en canvi, és responsable de fins al 100% dels guanys en alguns casos (Taula 6.3). En la badia de Tomales no han existit acumulacions extenses de macroalgues bentòniques, i l'autotròfia en la columna d'aigua es troba compensada àmpliament pel consum net bentònic, que arriba a provocar que el seu cicle anual sigui netament heterotròfic amb

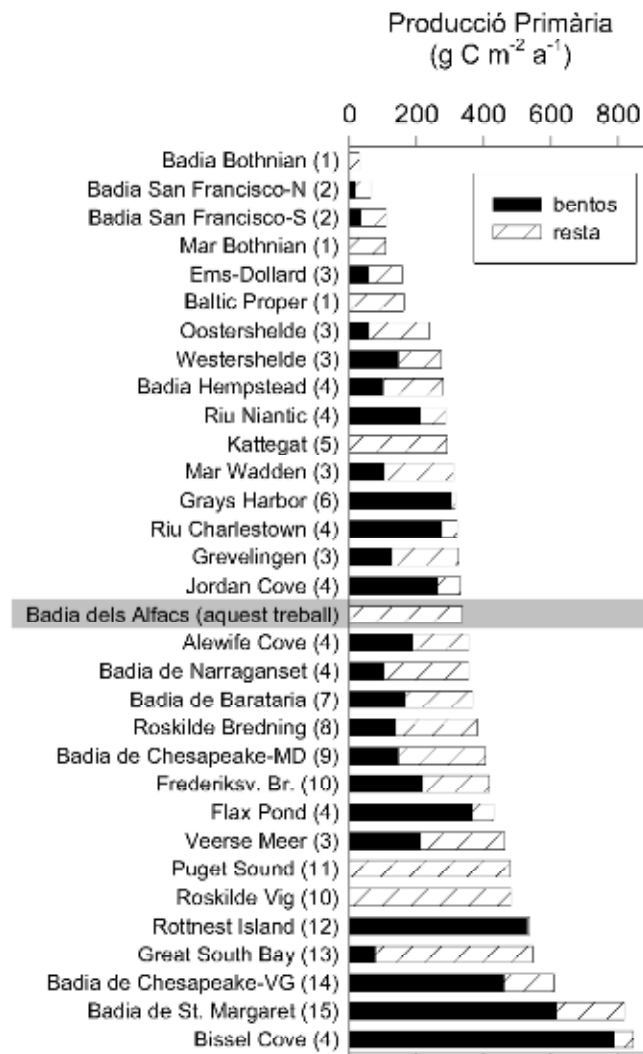


Figura 6.14. Producció primària total a 32 zones marines costaneres (referències en parèntesis). Modificat de Borum 1996: (1) Elmgren 1984, (2) Jassby *et al.* 1993, (3) Nienhuis 1992, (4) Welsh *et al.* 1982, (5) Richardson i Christoffersen 1991, Granéli i Sundbäck 1986, (6) Thom 1984, (7) Day *et al.* 1973, (8) Borum *et al.* 1990, (9) Kemp *et al.* 1983, (10) Winter *et al.* 1975, (11) Jensen *et al.* 1990, (12) Walker *et al.* 1988, (13) Lively *et al.* 1983, (14) Murray i Wetzel 1987, (15) Mann 1972.

un dèficit de $144 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (que equivaldrien a $-53 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ si es mantinguessin les mateixes condicions durant tot l'any). La badia dels Alfacs, recordem, mostra un balanç net anual biològic de $326 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ de superàvit, a causa de la producció planctònica, fonamentalment (calculat a partir de

la Taula 6.3). De totes formes, existeix una marcada oscil·lació estacional entre metabolisme fortament heterotròfic a l'estiu i de quasi-equilibri entre PPB i R durant hivern, segons apunten els mateixos autors, amb una mitjana de PB:R propera a 0.9, mentre que a la badia dels Alfacs, l'índex PB:R és molt superior (1.4 de mitjana; Taula 6.4). És a dir, el plàncton de la badia dels Alfacs produeix més per unitat de superfície que a la badia de Tomales (també hi ha el doble de fondària), i existeix la contribució de les macroalgues bentòniques en el balanç anual. Un altre diferència notable és la menor sortida d'oxigen per hidrodinamisme a la badia Tomales, que té un balanç hídric molt negatiu a l'estiu que genera situacions d'hipersalinitat (Largier *et al.* 1997, Hearn 1998, Harcourt Baldwin 2000), i possiblement, una menor exportació a l'atmosfera per acció del vent.

Respecte el grau d'eutròfia de la badia dels Alfacs, Camp (1994) la situava en la zona de les badies mesotròfiques, segons el diagrama de Vollenweider per a cossos d'aigua en funció de la càrrega de P, adaptat per a estuaris (Lee i Jones 1981). A partir dels resultats de la present tesi, i fent servir el criteri unificador de classificació proposat per Nixon (1995), la badia dels Alfacs quedaria situada dins la categoria de les badies entre mesotròfiques i eutròfiques (tenint en compte que hi ha una considerable incertesa en la precisió del resultat global del $326 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ de producció biològica bruta anual entre la columna d'aigua i el bentos, a partir dels guanys anuals mostrats a la Taula 6.3), de forma anàloga a altres badies mediterrànies com la de Tomales ($329 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, Smith *et al.* 1989).

Importància de la covariància de factors ecològics per l'aparició d'hipòxies

En l'estudi de sensibilitat de l'oxigen dissolt a canvis en les altres variables i paràmetres, s'ha analitzat la resposta de la variació d'un factor cada vegada, mentre es mantenen constants la resta. A la natura no varia un factor ecològic independentment de la resta sinó que varien plegats molts d'ells, i és precisament en aquesta covariància, o fins i tot, en la co-ocurrència de processos en l'espai o en el temps, que es troba la causa de l'aparició dels fenòmens de dèficit d'oxigen (Camp *et al.* 1991). Aquests autors van formular que la màxima probabilitat de que s'iniciés un fenomen hipòxic venia, en teoria, de l'aparició d'un pols intens de fitoplàncton (generalment acoblat amb el pas de fronts meteorològics), seguit d'un període de calma i mínimes entrades d'aigua dolça. Ara bé, aquesta combinació d'esdeveniments semblava poc probable, i en tot cas, molt localitzada en el temps. En aquesta tesi s'ha comprovat que aquestes condicions es poden donen lleument alguns hiverns, amb la reducció de les entrades d'aigua dolça pels canals dels arrossars, podent arribar a ser davallades puntuals més fortes si augmenta aquesta covariància en el temps dels factors desencadenants de les hipòxies, com devia passar lleument el 1997 i en especial el febrer de 1998 (Figura 2.12c), a diferència de 1991, en que no es va detectar cap davallada d'oxigen dissolt a la capa inferior durant l'hivern (Figura 3.13c). Aquests polsos hivernals solen ser causats per proliferacions massives de dinoflagelats.

Tanmateix, ja s'ha comentat que a finals d'estiu cal que coincideixin determinades condicions de terbolesa d'aigua, demanda biològica d'oxigen (ambdues influenciades pel contingut dels aport

d'aigua dolça dels canals de desguàs dels arrossars i les llacunes), i absència de vent o intercanvi de l'aigua de fons amb mar obert, fonamentalment, per a que pugui aparèixer un fenomen hipòxic (Figura 6.12). I també s'ha observat al llarg de la tesi que a l'estació *Cua*, la més allunyada de mar obert i amb menor renovació d'aigua (Camp 1994), és on es dona una alta respiració del bentos lligada a una alta biomassa d'*Alsidium corallinum* (Figura 5.6), hi vessen les aigües del canals de la Sèquia de l'Ala amb alts aportats nitrogenats inorgànics dissolts (entre 80 i 600 μM al llarg de l'any, dades no mostrades), i també es dona una alta DBO (Figura 4.2). Amb aquestes evidències queda clar que és a l'estació *Cua* on coincideixen en l'espai els factors "facilitadors" de les davallades d'oxigen en major mesura, depenent l'aparició de les hipòxies, tan sols, de que la covariància d'aquest factors en el temps permeti la seva coincidència a finals d'estiu.

Possibles mesures de prevenció de les anòxies

Evidentment cal apuntar mesures de gestió que minimitzin l'impacte dels aportats de nutrients sobre la badia especialment en els mesos conflictius de finals d'estiu, així com mesures paral·leles que garanteixin un mínim cabal d'aigua dolça que arribi a la badia per tal que no disminueixi perillosament la circulació estuariana, especialment en els moments més crítics com és a finals d'estiu, com s'ha destacat en l'apartat de resultats i en altres treballs previs (Invers i De Pedro 2001, Prat *et al.* 2001). Cal recordar que aquest flux d'entrada d'aigua dolça a la badia és més útil, en termes d'ajudar a mantenir l'oxigen dissolt prop dels valors de normòxia, quan s'hi aboca per algun dels canals més allunyats de la boca d'entrada a la badia (pel canal de la sèquia de l'Ala, per exemple, com s'ha considerat en aquesta tesi).

Bibliografia

- Anastacio, P. M., *et al.*, 1999. CRISP (crayfish and rice integrated system of production): 4. Modelling water, algae and oxygen dynamics. *Ecological Modelling*, 123 29-40.
- Andersen, F. O. i Kristensen, E., 1988. The influence of macrofauna on estuarine benthic community metabolism: a microcosm study. *Marine Biology*, 99 (4): 591-603.
- Arnal, I., 1980. Posibilitades de la Acuicultura en el litoral Español:
- Barnes, C. A. i Collias, E. E., 1958. *J. Mar. Res.*, 17 68.
- Beck, M. B., 1983. "A procedure for modelling", a *Mathematical Modelling of Water Quality: Streams, Lakes and Reservoirs*, 11-41. Wiley and Sons, Chichester.
- Bender, M., *et al.*, 1987. A comparison of four methods for determining planktonic community production. *Limnol. Oceanogr.*, 32 (5): 1085-1098.
- Bierman, V. J. J., *et al.*, 1994. A preliminary Mass Balance Model of Primary Productivity and Dissolved Oxygen in the Mississippi River Plume/Inner Gulf Shelf Region. *Estuaries*, 17 (4): 886-899.
- Bocci, M., *et al.*, 1997. Modelling biomass and nutrient dynamics in eelgrass (*Zostera marina* L.): Applications to the Lagoon of Venice (Italy) and Oresund (Denmark). *Ecological Modelling*, 102 67-80.
- Borum, J., 1996. "Shallow waters and Land/Sea Boundaries", a *Eutrophication in coastal Marine Ecosystems*, 52, 179-203. American Geophysical Union, Washington DC.
- Borum, J., *et al.*, 1990. Eutrofiering - effekter på marine primærproducenter. *NPO-forskning fra Miljøstyrelsen*, C3: 52.
- Boynton, W. R., *et al.*, 1997. "Interactions between physics and biology in the estuarine turbidity maximum (ETM) of Chesapeake Bay, USA (no citar sense consentiment de l'autor!!!)", a *International Council for the Exploration of the Sea*, 28. ICES, Copenhagen Denmark.
- Cadée, G.C. i Hegeman, J., 1974. Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. *Neth. J. Sea. Res.*, 8 260-291.

- Caffrey, J. M., 2003. "Production, respiration and net ecosystem metabolism in U.S. estuaries", a *Coastal Monitoring Through Partnerships*, 207-219.
- Caffrey, J. M., *et al.*, 1998. Changes in production and respiration during a spring phytoplankton bloom in San Francisco Bay, California, USA: Implications for net ecosystem metabolism. *Mar Ecol Prog Ser*, 172 1-12.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Camp, J., *et al.*, 1991. Production-consumption budget in an estuarine bay: how anoxia is prevented in a forced system. *Oecologia aquatica*, 10 145-152.
- Carmouze, J. P., *et al.*, 1991. Metabolism of a subtropical Brazilian lagoon. *Biogeochem.*, 14 129-148.
- Chapelle, A., *et al.*, 1994. Modelling eutrophication events in a coastal ecosystem. Sensitivity analysis. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39 529-548.
- Clavier, J., *et al.*, 1994. Benthic respiratory and photosynthetic quotients in a tropical lagoon. *C. R. Acad. Sci.*, III (317): 937-942.
- D'Avanzo, C., *et al.*, 1996. Ecosystem Production and Respiration in response to Eutrophication in Shallow Temperate Estuaries. *Marine Ecology Progress Series*, 141 263-274.
- Day, J. W. J., *et al.*, 1973. Community structure and carbon budget of a salt-marsh and shallow bay estuarine system in Louisiana. *Centre for Wetland Resouces*: 79.
- Degrandpre, M. D., *et al.*, 1997. Simultaneous mooring-based measurements of seawater CO₂ and O₂ off Cape Hatteras, North Carolina. *Limnology and Oceanography*, 42 (1): 21-28.
- Delgado, M., 1986. Ecología de diatomeas costeras. Relación Pláncton-Bentos. Doctoral, 261 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Di-Toro, D. M., 1993. Uncertainty analysis of the Green Bay mass balance models. *OME 36th Conference of the International Association for the Great Lakes Research*: 60.
- Dollar, S. J., *et al.*, 1991. Annual cycle of benthic nutrient fluxes in Tomales Bay, California, and contribution of the benthos to total ecosystem metabolism. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 79 115-125.

- Elliot, J. M. i Davison, W., 1975. Energy equivalents of oxygen consumption in animal energetics. *Oecologia*, 19 195-204.
- Elmgren, R., 1984. Trophic dynamics in the enclosed, brackish Baltic Sea. *Rapp. P.-v. Réun. Intl Explor. Mer.*, 183 152-169.
- Fielding, P., *et al.*, 1988. Benthic diatom biomass, production, and sediment chlorophyll in Langebaan Lagoon, South Africa. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27 413-426.
- Fourqurean, J. W., *et al.*, 1997. Contributions of the plankton community to ecosystem respiration, Tomales Bay, California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 44 (4): 493-505.
- Gade, H. G., 1961. On some oceanographic observations in the southeaster caribbean sea and adjacent atlantic ocean with special reference to the influence of the Orinoco River. *Bol. Inst. Oceanogr. Univ. Oriente.*, 1 (2): 287-342.
- Gardner, R. H. R., *et al.*, 1981. A comparison of sensitivity analysis and error analysis based on a stream ecosystem model. *Ecol. Model.*, 12 173-190.
- Granéli, W. i Sundbäck, K., 1986. Can microbenthic photosynthesis influence below-halocline oxygen conditions in the Kattegat? *Ophelia*, 26 195-206.
- Hamilton, D. i Herzfeld, M., 2001. Computational Ecosystem Dynamics Model (CAEDYM). An ecological water quality model designed for coupling with hydrodynamic drivers:
- Hamilton, D. P. i Schladow, S. G., 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs: Part I. Model description. *Ecological Modelling*, 96 (1-3): 91-110.
- Hanes, N. B. i Irvine, R. L., 1968. New techniques for measuring oxygen uptake rates of benthic systems. *J. Water Pollut. Control Fed.*, 40 223-232.
- Harcourt Baldwin, J. L., 2000. "Circulation and residence of water in small Mediterranean-climate estuaries", a *10th Southern African Marine Science Symposium SAMSS 2000: Land, Sea and People in the New Millennium Abstracts*, 1. University of Port Elizabeth, Port Elizabeth, South Africa.
- Hart, D. R., *et al.*, 2000. Seasonal dynamics of the Lake Kinneret food web: The importance of the microbial loop. *Limnology and Oceanography*, 45 (2): 350-361.

- Hearn, C. J., 1998. Application of the Stommel model to shallow mediterranean estuaries and their characterization. *Journal of Geophysical Research C Oceans*, 103 (C5): 10,391-10,404.
- Heath, M., 1995. An holistic analysis of the coupling between physical and biological processes in the coastal zone. *Ophelia*, 42 95-125.
- Hopkinson, C. S. J. i Vallino, J. J., 1995. The Relationships Among Man's Activities in Watersheds and Estuaries: A Model of Runoff Effects on Patterns of Estuarine Community Metabolism. *Estuaries*, 18 (4): 598-621.
- Hutchinson, G. E., 1957. Geography, physics, and chemistry. *A treatise on Limnology*, 1:
- Ibáñez, C., *et al.*, 2007. Changes in dissolved nutrients in the lower Ebro river: causes and consequences. *Limnetica*, 26 (2, in press):
- Invers, O. i De Pedro, X., 2001. Anàlisi de riscos d'anòxies i toxicitat de macroalgues a la badia dels Alfacs:
- Iriarte, A., *et al.*, 1997. Primary plankton production, respiration and nitrification in a shallow temperature estuary during summer. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 208 (1-2): 127-151.
- Janse, J. H. i Aldenberg, T., 1990. Modelling phosphorus fluxes in the hypertrophic loosdrecht lakes netherlands. *Hydrobiol Bull*, 24 69-90.
- Jassby, A. D., *et al.*, 1993. Organic carbon sources and sinks in San Francisco Bay: variability induced by river flow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 95 39-54.
- Jensen, L. M., *et al.*, 1990. Plankton community respiration along a nutrient gradient in a shallow Danish estuary. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 61 (1-2): 75-85.
- Johnston, A. M., *et al.*, 1992. The acquisition of inorganic carbon by four red macroalgae. *Oecologia*, 92 (3): 317-326.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Jørgensen, S. E., 1993. State of the art of ecological modelling. *International Congress on Modelling and Simulation*:

- Jørgensen, S. E., 1994. Fundamentals of ecological modelling. *Developments in Environmental Modelling*, 19: 628.
- Katsuyuki, A. i Satoru, T., 1997. Effects of Water Movement on the Fluctuation of Oxygen Concentration in the Lower Layer of Gokasho Bay on the East Coast of Honshu Island, Japan. *Interactions Between Cultured Species and Naturally Occurring Species in the Environment. Twenty-fourth U.S.-Japan Aquaculture Panel Symposium*, 24: 85-89.
- Kemp, W. M. i Boynton, W. R., 1980. Influence of Biological and Physical Processes on dissolved oxygen dynamics in an Estuarine System: Implications for Measurement of Community Metabolism. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 2 407-431.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1983. The decline of submerged vascular plants in upper Chesapeake Bay: summary of results concerning possible causes. *Mar. Technol. Soc. J.*, 17 78-89.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1992. Seasonal depletion of oxygen from bottom waters of Chesapeake bay: Roles of benthic and planktonic respiration and physical exchange processes. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 85 (1-2): 137-152.
- Kemp, W. M., *et al.*, 1993. Ecosystem metabolism and organic carbon balance in Chesapeake Bay. *12th Biennial Estuarine Research Federation Conf. absts.*:
- Kemp, W. M., *et al.*, 1997. Organic carbon balance and net ecosystem metabolism in Chesapeake bay. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 150 229-248.
- Kenney, B. E., *et al.*, 1988. Community oxygen metabolism in a shallow tidal estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 27 33-43.
- Kremer, J. N. i Nixon, S. W., 1978. A coastal marine ecosystem. Simulation and analysis. *Ecological studies*, 24: 220.
- Langdon, C., 1988. On the causes of interspecific differences in the growth-irradiance relationship for phytoplankton. 2. A general review. *J. Plankton Res.*, 10 (6): 1291-1312.
- Largier, J. L., *et al.*, 1997. Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45 (6): 789-797.
- Lee, G. F. i Jones, R. A., 1981. "Application of the OECD eutrophication modeling approach to estuaries", a *Estuaries and Nutrients.*, 549-568.

- Lively, J. S., *et al.*, 1983. Phytoplankton ecology of a barrier island estuary: Great South Bay, New York. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 16 51-68.
- Loehle, C., 1997. A hypothesis testing framework for evaluating ecosystem model performance. *Ecological Modelling*, 97 153-165.
- LOICZ, L.-O. I. i. t. C. Z. I. G.-B. P. I., 2000. Rules of Thumb in Coastal Nutrient Budgets: General Notes:
- Mann, K. H., 1972. Ecological energetics of the sea-weed zone in the marine bay on the Atlantic coast of Canada II. Productivity of the seaweeds. *Mar. Biol.*, 14 199-209.
- Margalef, R., 1974. *Ecología*: 951.
- Martínez, A., 1990. Estudio ecológico de las algas efemerofíceas: papel en los flujos de materia y energía en un sistema estuárico (Bahía de los Alfaques, Delta del Ebro, España). Ph. D. Thesis, 166 pp., *Departamento de Ecología*, Universidad de Barcelona.
- Mateo, M. A., *et al.*, 2003. *Posidonia oceanica* 'banquettes' : a preliminary assessment of the relevance for meadow carbon and nutrients budget. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56 85-90.
- McTammany, M. E., *et al.*, 2003. Longitudinal patterns of metabolism in a southern Appalachian river. *Journal of the North American Benthological Society*, 22 (3): 359-370.
- Munekage, Y., 1992. Application of a two-layer box model to dissolved oxygen budget in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 35 (1): 129-145.
- Munekage, Y., 1995. Studies on bottom water exchange and dissolved oxygen (DO) budget due to water intrusion in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 38 (1): 89-103.
- Murray, L. i Wetzell, R. L., 1987. Oxygen production and consumption associated with the major autotrophic components in two temperate seagrass communities. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 38 231-239.
- Nienhuis, P. H., 1992. Eutrophication, water management, and the functioning of Dutch estuaries and coastal lagoons. *Estuaries*, 15 538-548.

- Nixon, S. W., 1986. "Nutrient dynamics and the productivity of marine coastal waters", a *Marine Environment and Pollution*, 97-115. The Alden Press, Oxford.
- Nixon, S. W., 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41 199-219.
- Nixon, S. W. i Oviatt, C. A., 1973. Ecology of a New England salt marsh. *Ecological Monographs*, 43 463-498.
- Nixon, S. W., *et al.*, 1986. Nutrients and the productivity of estuaries and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. S. Afr.*, 12 (1/2): 43-71.
- Odum, E. P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, 164 262-270.
- Odum, E. P., 1971. *Fundamentals of Ecology*:
- Odum, H. T., 1967. "Biological circuits and the marine systems of Texas", a *Pollution and Marine Ecology*, 99-157. Wiley Interscience, New York, USA.
- Officer, C. B., *et al.*, 1984. Chesapeake Bay Anoxia: Origin, Development, and Significance. *Science*, 223 22-27.
- Oviatt, C. A., *et al.*, 1986. Patterns of productivity during eutrophication in mesocosms experiment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 28 69-80.
- Park, K., *et al.*, 1996. A numerical model study of hypoxia in the tidal Rappahannock river of Chesapeake Bay. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 42 563-581.
- Pastres, R., *et al.*, 1997. Local sensitivity analysis of a distributed parameters water quality model. *Reliability Engineering and System Safety*, 57 21-30.
- Peckol, P. i Rivers, J. S., 1996. Contribution by macroalgal mats to primary production of a shallow embayment under high and low nitrogen-loading rates. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 43 (3): 311-325.
- Pérez, M., *et al.*, in press. Changes in benthic vegetation in a Mediterranean estuarine bay (Alfacs Bay, Spain).
- Petersen, J. E., *et al.*, 1998. Coastal plankton responses to turbulent mixing in experimental ecosystems. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 171 23-41.

- Pinckney, J. L., 1994. "Development of an irradiance-based ecophysiological model for intertidal benthic microalgal production", a *Biostabilization of sediments*, 55-84. Bibliotheks and Informations system der Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg.
- Pomeroy, L. R., *et al.*, 1995. Limits to growth and respiration of bacterioplankton in the Gulf of Mexico. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 117 (1-3): 259-268.
- Prat, N., *et al.*, 2001. El curso inferior del Ebro y su delta. Situación actual. Impacto ambiental del Plan Hidrológico Nacional. Un nuevo modelo de gestión del agua para el bajo Ebro.:
- Press, W. H., *et al.*, 1993. Numerical recipes in FORTRAN. The art of scientific computing.: 964.
- Prosser, C. L. i Brown, F. A., 1965. Comparative Animal Physiology:
- Richardson, K. i Christoffersen, A., 1991. Seasonal distribution and production of phytoplankton in the southern Kattegat. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 78 217-227.
- Romero, J. R. R., *et al.*, 2003. Computational Aquatic Ecosystem Dynamic Model: CAEDYM v2 Science Manual:
- Sampou, P. i Kemp, W. M., 1994. Factors regulating plankton community respiration in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 110 (2-3): 249-258.
- Schinke, H. i Matthaus, W., 1998. On the causes of major Baltic inflows- an analysis of long time series. *Cont Shelf Res*, 18 (1): 67-97.
- Schladow, S. G. i Hamilton, D. P., 1997. Prediction of water quality in lakes and reservoirs: Part II. Model calibration, sensitivity analysis and application. *Ecological Modelling*, 96 (1-3): 111-123.
- Seiki, T., *et al.*, 1989. Benthic nutrient remineralization and oxygen consumption in the coastal area of Hiroshima Bay. *Water Res.*, 23 (2): 219-228.
- Seliger, H. H. i Boggs, J. A., 1988. "Long term patterns of anoxia in the Chesapeake Bay", a *Understanding the estuary: advances in Chesapeake Bay research*, 129, 570-583. Chesapeake Research Consortium. Solomons.,
- Skjelvan, I., *et al.*, 2001. Oxygen fluxes in the Norwegian Atlantic Current. *Marine Chemistry*, 73 (3-4): 291-303.

- Smith, S. V. i Hollibaugh, J. T., 1993. Coastal metabolism and the oceanic organic carbon balance. *Rev. Geophys.*, 31 75-89.
- Smith, S. V. i Hollibaugh, J. T., 1997. Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecological Monographs*, 67 (4): 509-533.
- Smith, S. V., *et al.*, 1989. Tomales Bay, California: A case for carbon-controlled nitrogen cycling. *Limnol. Oceanogr.*, 34 (1): 37-52.
- Smith, S. V., *et al.*, 1991. Tomales Bay metabolism: C-N-P stoichiometry and ecosystem heterotrophy at the land-sea interface. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 33 (3): 223-257.
- Smith, S. V. i Mackenzie, F. T., 1987. The ocean as a net heterotrophic system: implications from the global biogeochemical cycle. *Global Biogeochem. Cycles*, 1 187-198.
- Soetaert, K., *et al.*, 2002. FEMME, a flexible environment for mathematically modelling the environment. *Ecological Modelling*, 151 177-193.
- Soetaert, K., *et al.*, 2000. FEMME: A flexible environment for mathematically modelling the environment: 202.
- Solidoro, C., *et al.*, 1996. Sensitivity analysis of an eutrophication model for shallow water environments colonized by *Ulva rigida*. *Annali di Chimica. Società Chimica Italiana*, 86 677-684.
- Stigebrandt, A., 2001. "Fiord circulation", a *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2, 897-902. Academic Press, San Diego, USA.
- Swaney, D. P., *et al.*, 1999. A novel approach for estimating ecosystem production and respiration in estuaries: Application to the oligohaline and mesohaline Hudson River. *Limnol. Oceanogr.*, 44 (6): 1509-1521.
- Thom, R. M., 1984. Primary production in Grays Harbor Estuary, Washington. *Bull. S. Calif. Acad. Sci.*, 83 99-105.
- Thomann, R. V. i Mueller, J. A., 1987a. "Eutrophication", a *Principles of surface water quality modelling and control*, 385-493. Harper & Row, New York.
- Thomann, R. V. i Mueller, J. A., 1987b. Principles of surface water quality modelling and control:

- Turner, R. E., *et al.*, 1987. The role of stratification in the deoxygenation of Mobile Bay and adjacent shelf bottom waters. *Estuaries*, 10 13-19.
- van Es, F. B., 1982. Community metabolism of intertidal flats in the Ems-Dollar Estuary. *Mar. Biol.*, 66 95-108.
- Walker, D. I., *et al.*, 1988. Comparison of annual production and nutrient status of the primary producers in a shallow limestone reef system (Rottnest Island), Western Australia. *Australian Marine Science Association Silver Jubilee 1963-1988 Annual Conference*: 183-187.
- Wang, P. F., *et al.*, 1999. Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49 (1): 1-20.
- Weigelt, M., 1990. Oxygen conditions in the deep water of Kiel Bay and the impact of inflowing salt-rich water from the Kattegat. *Meeresforsch*, 33 (1): 1-22.
- Welsh, B. L., *et al.*, 1982. "Relationship between physical characteristics and organic carbon sources as a basis for comparing estuaries in southern New England", a *Estuarine comparisons*, 53-67. Academic Press, New York.
- Wen, C. G., *et al.*, 1981. Determination of Sensitivity of Water Quality Parameters for Stream Pollution Control. *J. Environ. Manage.*, 14 (1): 17-34.
- Wen, C. G., *et al.*, 1982. Determination of Sensitivity of Water Quality Parameters for Stream Pollution Control. *J. Environ. Manage.*, 14 (1): 17-34.
- Williams, P. J. I., 1982. "Microbial contribution to overall plankton community respiration-studies in enclosures", a *Marine Mesocosms: Biological and Chemical Research in Experimental Ecosystems*, 305-322. Springer-Verlag, Amsterdam.
- Williams, S. L., 1984. Decomposition of the tropical macroalga *Caulerpa cupressoides* (West) C. Agardh: field and laboratory studies. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 80 109-124.
- Winter, D. F., *et al.*, 1975. The dynamics of phytoplankton blooms in Puget Sound, a fjord in the Northwestern United States. *Mar. Biol.*, 29 139-176.
- Ziegler, S. i Benner, R., 1998. Ecosystem metabolism in a subtropical, seagrass-dominated lagoon. *Mar Ecol Prog Ser*, 173 1-12.

Capítol 7. Conclusions

Capítol 7 . Conclusions

Les conclusions que s'extreuen del treball presentat són detallades i discutides en cada capítol. Algunes d'elles concorden amb el que se sabia, o es creia saber, sobre el funcionament de la badia dels Alfacs. Altres, quant menys, sorprenen. El possible origen de les discrepàncies també ha estat discutit en cada capítol. No obstant, un cop finalitzada la memòria és bo recopilar a mode de conclusions generals alguns aspectes que semblen rellevants per a un millor enteniment dels processos que governen el comportament de la badia i que han de tenir-se en compte en treballs posteriors.

La major part del flux net d'entrada d'aigua de mar a la badia sembla estar generat per l'aport d'aigua dolça, que pot provocar més del 50 % de la velocitat instantània total d'entrada d'aigua salada a la badia. El vent, per la seva banda, també pot influir-hi, encara que secundàriament. Són igualment secundaris els canvis en la pressió atmosfèrica, malgrat en situacions puntuals poden ser responsables de fins a un terç del flux net residual diari.

Les concentracions de nutrients de la badia no semblen haver canviat massa en la dècada dels anys 90. Per contra, s'ha detectat un augment de nitrogen inorgànic dissolt (respecte 1986-87) als canals de desguàs dels arrossars. Donat que la concentració de nitrogen al tram baix del riu Ebre ha baixat clarament a partir de mitjans dels anys 90, aquest increment de nutrients a l'aigua de desguàs cal atribuir-lo a canvis en les pràctiques agrícoles del delta.

Alfacs té un cicle hidrològic governat principalment per activitats agrícoles a diferència de l'habitual en estuaris micromareals que és per cicle estacional; d'aquí s'explica que les hipòxies estiguin menys lligades al període posterior a l'època de precipitacions. El període de canals oberts a Alfacs es situa habitualment entre maig i octubre, tot i que de vegades hi ha variacions importants en el flux cap a la badia al llarg d'aquests mesos també a causa de necessitats puntuals associades a la pràctica agrícola.

Les situacions d'hipòxia-anòxia no es donen de forma constant cada any (de fet, dels dos anys estudiats més intensament es va donar només en un d'ells). I les diferències entre anys no deuen atribuir-se de forma simple a una sola causa.

Tampoc l'acabament dels períodes hipòxics es pot atribuir estrictament a una sola causa (més enllà del descens a la tardor – hivern de les temperatures que ha d'utilitzar-se com a marc de referència).

La producció bruta fitoplanctònica a la Badia dels Alfacs oscil·la entre 60 i 227 mg O₂ m⁻³ h⁻¹, amb productivitats netes entre 20.3 i 63.8 mg O₂ mg Cl.a⁻¹ h⁻¹. Durant els mesos d'estiu, les produccions brutes i netes del plàncton són les més baixes de l'any.

La cubeta de la badia dels Alfacs estava recoberta quasi totalment el 1997 per dues espècies de macroalgues: el cloròfit sifonal *Caulerpa prolifera* (Forsskål) J.V.Lamouroux, i el rodòfit ramificat *Alsidium corallinum* C.Agardh, fet que contrasta amb la baixa cobertura existent al 1987. La colonització de la badia per part de *C. prolifera* podria estar relacionada amb l'increment de les temperatures mínimes hivernals en l'època estudiada, que facilitarien la seva supervivència. Les dues macroalgues van presentar distribucions de biomassa pràcticament complementàries a la cubeta de la badia. L'extrem oest estava dominat majoritàriament per poblacions de *C. prolifera*, l'extrem est dominat majoritàriament per poblacions d'*A. corallinum*, i la zona central per una barreja d'ambdues. Les biomasses van oscil·lar habitualment entre 0 i 620 g PS m⁻², depenent de l'espècie, lloc i moment de l'any. La màxima biomassa de *C. prolifera* s'assoleix en primavera, mentre que en altres poblacions d'aquesta espècie, aquests màxims es donen una mica més tard, a l'estiu o bé a la tardor. Aquest fet podria estar relacionat amb què als Alfacs la llum al fons és màxima a finals d'Abril, i disminueix cap a finals de primavera i estiu, a causa d'un increment de turbulència. El fet de que ambdues espècies estiguin defensades químicament (caulerpenina a *Caulerpa prolifera*, i àcid domoic a *Alsidium corallinum*) suggereix que pot ser la seva baixa palatabilitat la responsable de les grans acumulacions de biomassa.

L'extinció de la llum a la mata algal és molt important, i fa que la irradiància que arriba a sota d'aquesta mata sigui d'entre el 15 i el 50% del que hi arriba a la part superior, deixant arribar al sediment només entre l'1% i el 9% de la llum incident a la superfície de l'aigua.

Una gran part de dies de l'any (prop del 30%), les espècies fotosintetitzen per sota de la llum de saturació. Les millors condicions de llum es donen a la primavera, moment en que són freqüents dies amb més de 10 hores de producció a saturació de llum. El màxim de producció primària bruta es dona al juny per ambdues espècies de macroalgues, tot i que no mostren les mateixes produccions màximes a les mateixes zones de la badia. Cal notar que el setembre és un mes en que les produccions són molt baixes després dels màxims estivals dels mesos previs. En canvi, les respiracions macroalgals de setembre no són les més altes de l'any a les estacions *Mig* i *Cua*, sinó que ho són a finals de primavera.

El balanç anual d'oxigen de tot el bentos és lleugerament negatiu. Només és positiu a primavera, i els valors més negatius són durant la tardor i l'hivern. Per zones, és positiu en balanç anual per l'estació *Boca* i *Mig*, i negatiu tant per a l'estació *Cua* com per a tota la badia en conjunt. En canvi, el balanç net anual de les macroalgues pel conjunt de la badia és positiu i de prop de 400 g O₂ m⁻² a⁻¹, amb una respiració anual mitjana de 900 g O₂ m⁻² a⁻¹, essent la respiració del sediment de l'ordre de 500 g O₂ m⁻² a⁻¹.

Els macròfits poden exercir una paper molt important en el control de les anòxies. Les simulacions dels balanços bentònics d'oxigen a finals d'estiu amb columna d'aigua estratificada indiquen que en absència d'aports hidrodinàmics d'oxigen, l'anòxia a la capa de fons de l'estació *Cua* es pot assolir entre uns pocs dies i les quatre setmanes, o bé no assolir-se, depenent de l'escenari de llum i biomassa considerat. En la situació més dolenta (molt baixa irradiància i biomassa de macròfits màxima) i partint d'una situació de normòxia, s'arribaria al nivell d'anòxia en un termini de 3 dies. En una situació d'irradiància alta i també alta biomassa algal, la situació de normòxia es mantindria indefinidament. Així, les macroalgues juguen un doble paper: augmenten en general la producció neta de la badia en balanç anual, però també fan augmentar el risc de davallades fortes d'oxigen dissolt de la columna d'aigua en situacions puntuals com les de finals d'estiu a la badia dels Alfacs.

El balanç net anual de tot l'ecosistema és lleugerament positiu en còmput anual ($26.5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Són clarament positius els balanços parcials d'hivern i estiu amb prop de $700 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ cadascun, i clarament negatius el de primavera ($-860 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) i el de tardor ($-303 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). El fitoplàncton és el productor net d'oxigen més important en totes les estacions climatològiques, i l'únic en algunes d'elles com a la tardor, en còmput global. En segon terme, per quantitat d'aports nets d'oxigen, es troben les macroalgues.

El sediment representa la principal sortida d'oxigen de l'aigua de la badia a l'estiu i tardor. L'intercanvi amb l'atmosfera juga un paper important a l'hivern i primavera, però lògicament només a la capa superficial. La respiració del plàncton és la segona sortida d'oxigen en importància, després del sediment.

Per terme mig, la badia exporta oxigen tant cap a l'atmosfera com cap a mar obert. La magnitud d'aquests fluxos és una mica inferior a la dels processos biològics. En casos puntuals, l'intercanvi amb l'atmosfera pot incrementar-se (fins a representar valors que superen la producció planctònica) o invertir-se (entrades netes de l'atmosfera cap a l'aigua).

L'ajust entre l'oxigen dissolt observat i l'estimat pel model desenvolupat en el marc d'aquesta tesi ("*OMMEL - Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons*") és bo la major part de l'any analitzat (1997), si bé hi apareixen discrepàncies considerables en alguns moments concrets. L'ajust és alt excepte en els mesos en que els canals de rec i desguàs dels arrossars es troben tancats (finals de tardor - hivern). Aquesta discrepància es podria explicar per una subestimació tant de l'entrada d'oxigen per hidrodinamisme advectionu o d'intercanvi (difusiu) horitzontal i també vertical, mediats per efecte de seques i ones internes com dels fluxos reals d'aigua dolça entrats a la badia (via canals i/o aigua freàtica) durant aquests mesos de novembre a març.

L'anàlisi de sensibilitat del model indica que la variable que més pot afectar l'oxigen dissolt és la terbolesa de l'aigua. Per darrera d'aquesta, en importància, es troben la biomassa de fitoplàncton i la seva productivitat, i la respiració del sediment, en el cas de la capa inferior, i a la capa superior, la velocitat del vent, la irradiància de saturació del fitoplàncton, i la demanda bioquímica d'oxigen. L'efecte relatiu dels augments del flux d'entrada d'aigua dolça per qualsevol dels tres canals principals que hi vessen aigua (o tots tres alhora) sobre l'oxigen dissolt de la badia és molt baix si es considera tot l'any, però en canvi, és molt superior si és té en compte només el més de setembre, essent el flux pel canal de la sèquia del Ala el que té un major efecte respecte el flux de qualsevol de tots tres canals per separat. Una altra idea que s'extreu i que s'obté de la calibració del model és que una part important (de fins al 80%) de la clorofil·la a de la capa fonda a finals d'estiu és fotosintèticament inactiva.

La presència de macroalgues sembla haver fet canviar el signe del balanç d'oxigen de la capa fonda. Així, mentre que a finals dels 80 el balanç net mitjà anual de la capa fonda era negatiu ($-0.55 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$), l'estimació d'aquest balanç en aquesta tesi (finals dels 90, amb macròfits) dona un valor de $+0.50 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. En conjunt, l'ecosistema (incloent també els processos físics) té les entrades i sortides força equilibrades en balanç anual (balanç net inferior a $+0.01 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$), per a tota la badia i tota la columna d'aigua. Només el compartiment bentònic de l'estació *Cua* pot ser considerat lleugerament heterotròfic en valors acumulats anuals.

El balanç net de producció biològica de la badia dels Alfacs a finals dels anys 90 va ser de $326 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, atribuïbles quasi en la seva totalitat al fitoplàncton. Atenent a Nixon (1995), la badia dels Alfacs quedaria situada dins la categoria de les badies entre mesotròfiques i eutròfiques. A més, l'exportació d'oxigen cap a l'atmosfera representa una exportació paral·lela de carboni de l'ordre de $110 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; dels quals s'estima que s'exporten de l'ordre de $30 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ cap a mar obert, i la resta, $80 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, és el que versemblantment s'acumula en el sediment.

Del conjunt d'aquesta tesi es desprèn que les situacions d'hipòxia no són causades per un factor únic, aïllat i identificable, sinó per la coincidència en l'espai i en el temps de tot un seguit de condicions, com poden ser l'alta temperatura, terbolesa de la columna d'aigua, alta biomassa de macròfits i respiració del sediment i absència de vents, entre d'altres. La situació hipòxica sembla mantenir-se mentre aquestes condicions no canviïn substancialment i hi hagi poca renovació de l'aigua de fons, sigui per manca de flux advection per intrusió d'aigua salada exterior, o bé per manca de flux no advection amb la capa superior. Finalment, la hipòxia minva i pot arribar a desaparèixer quan existeixen vents forts ocasionals o més lleus però continuats, que trenquin o erosionin l'estratificació de la columna d'aigua, o quan hi ha renovació de l'aigua fonda de la badia per entrada d'aigua marina de l'exterior, causada per exemple, pels aports d'aigua dolça pels canals.

De tot el que s'ha dit fins ara es pot deduir que el marge de maniobra per reduir el risc d'anòxies és petit. Potser el factor sobre el que es pot actuar és el flux d'aigua dolça d'entrada a la badia. En

aquest sentit, convé garantir un mínim cabal d'aigua dolça que arribi a la badia per tal que no disminueixi perillosament la circulació estuària, especialment en els moments més crítics com és a finals d'estiu. Com més aigua s'hi aboqui per algun dels canals més allunyats de la boca d'entrada a la badia (com el canal de la sèquia de l'Ala), més difícil és que apareguin o es mantinguin les hipòxies.

Conclusions (English version)

Conclusions extracted from this memory are detailed and discussed in each chapter. Some of them agree with what it was previously known, or thought to be known, about Alfacs bay functioning. Others are, at least, surprising. The possible source of the discrepancies has also been discussed in each chapter. Nevertheless, once the memory is finished, it is wise to collect as a sort of general conclusions some aspects that looked like relevant for a better understanding of the processes ruling the bay behavior, which have to be taken into account in further works.

The greater part of the saltwater net inflow to the bay seems to be produced by freshwater inflow, which can trigger more than the 50 % of the instantaneous total velocity of marine water inflow to the bay. The wind, on its side, can also influence it, although secondarily. Changes in atmospheric pressure are also secondary, although in punctual situations can be responsible for up to a third of the net daily residual flow.

Nutrient concentrations doesn't seem to have changed that much in the decade of the nineties. On the contrary, an increase in dissolved inorganic nitrogen (respect to 1986-87) has been detected in the drainage channels from the rice paddies. Since nitrogen concentration in the lower reaches of Ebro River have clearly decreased after mid nineties, this increase in drainage water nutrients has to be attributed to changes in the agricultural practices at the Ebro River delta.

Alfacs bay has an hydrological cycle ruled mainly by agricultural activities, in contrast with the common behavior in microtidal estuaries which is ruled by seasonal cycle; it can be explained from here that hypoxias are less tight to period after the months of more precipitation. Period of open channels in Alfacs is frequently located between May and October, even if sometimes there are important variations in the flow to the bay along these months also because of the occasional needs associated to agricultural practice.

Hypoxic-anoxic situations do not occur as a constant event every year (in fact, it appeared only in one year out of the two more intensely studied). And differences among years should not be simply attributed to a single cause alone.

The end of the hypoxic periods can not be attributed either strictly to one single cause (beyond the decrease in temperature in autumn-winter, which has to be considered as a reference frame).

Phytoplankton gross production in Alfacs bay varies between 60 and 227 mg O₂ m⁻³ h⁻¹, with net productivities between 20.3 and 63.8 mg O₂ mg Chl.a⁻¹ h⁻¹. During the summer months, the gross and net plankton productions are the lowest of the year.

Alfacs bay basin was almost totally covered in 1997 by two species of macroalgae: the siphonal chlorophyte *Caulerpa prolifera* (Forsskål) J.V.Lamouroux, and the branched rhodophyte *Alsidium corallinum* C.Agardh, which contrasts with the low coverage existing back in 1987. The bay colonization by *C. prolifera* could be related with the increase in winter minimum temperatures for the studied period, which would facilitate its survival. The two macroalgae showed biomass distributions in the bay basin which are practically complementary. Western zone was mostly dominated by *C. prolifera*, eastern zone mostly dominated by *A. corallinum*, and central zone by a mixture of both. The biomasses were usually between 0 and 620 g PS m⁻², depending of species, place and time of year. The maximum biomass of *C. prolifera* is reached in spring, whereas in other populations of this species, these maximum occur a bit later, in summer or in autumn. This fact might be related with the one that light in the bottom of Alfacs is maximum at the end of April, and diminishes at the end of spring and in summer, due to an increase in turbidity. The fact that both species are chemically defended (caulerpenine in *Caulerpa prolifera*, and domoic acid in *Alsidium corallinum*), suggests that their low edibility can be the responsible for the big biomass accumulations.

Light extinction in algal mat is very important, and it produces that the irradiance reaching below this mat is between 15 and 50% of what reaches the top of the mat, allowing to arrive at sediment only between 1 and 9% of the incident light at the water surface.

A big part of days of the year (near 30%) species photosynthesize below saturation light. The best light conditions occur in spring, when days with more than 10 hours of production at saturation of light are frequent. The maximum gross primary production is in June for both macroalgal species, even if they do not show the same maximum productions at the same bay zones. It is necessary to state that September is a month in which productions are very low after the summer maxima in previous months. However, macroalgal respirations in September are not the highest of the year in stations "Middle" (Mig) and "Tail" (Cua), but they are by the end of spring.

Annual oxygen balance for all benthos is slightly negative. It's only positive in Spring, and the more negative values are during autumn and winter. By zones, it is positive in annual balance for station Mouth (Boca) and Middle (Mig), and negative in station Tail (Cua) and also for all the bay as a whole. Instead, annual net balance of macroalgae for the whole bay is positive and close to 400 gO₂ m⁻² y⁻¹, with an average annual respiration of 900 gO₂ m⁻² y⁻¹, being respiration of sediment around 500 gO₂ m⁻² y⁻¹.

Macrophytes can play a very important role in the control of anoxic events. Simulations of benthic oxygen balances for the end of summer with stratified water column indicate that in absence of hydrodynamic oxygen inputs anoxia in station Tail (Cua) can be attained between a few days and four weeks, or not attained at all, depending on the light and biomass scenario considered. In the worst situation (very low irradiance and maximum macrophytes biomass) and starting from a normoxic situation, the level of anoxia would arrive in 3 days. On the other hand, in a situation of high irradiance and also high algal biomass, the normoxic situation would remain indefinitely. Thus, macroalgae play a double role: they increase, in general, the net production of the bay in annual balance, and they also increase the risk of strong dissolved oxygen decreases of the water column in punctual situations, like the end of summer in Alfacs bay.

The net annual balance of the whole ecosystem is slightly positive in annual budget ($26.5 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), being clearly positive the partial winter and summer balances, with near $700 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ each, and clearly negative in spring ($-860 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) and also, to a lesser extent, in autumn ($-303 \text{ mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Phytoplankton is the most important dissolved oxygen net producer in all climatological stations, and the only one in some of them, as a the autumn, in global summary. Macralgae are in second position in terms of net oxygen production.

Sediment represents the main exit of oxygen from water in summer and autumn. Exchange with atmosphere plays an important role in winter and spring, but logically, only in the surface layer. Plankton respiration is the second exit of oxygen in importance, after sediment.

As an average, the bay exports oxygen to the atmosphere and to the open sea. The magnitude of these flows is a little lower than the one of biological processes. In punctual cases, exchange with atmosphere can be increased (up to represent values higher than the ones of plankton production) or reverted (net inflows from atmosphere to the water).

The adjustment between observed and estimated dissolved oxygen at the model developed in the frame of this Ph.D. thesis ("OMMEL - Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons") is good for the greater part of the analyzed year (1997), even if some considerable discrepancies arise in some concrete moments. Adjustment is high except in the months in which drainage channels from the paddies are closed (end of autumn - winter). This discrepancy could be explained by underestimation as much of oxygen entrance by advective or diffusive (exchange) horizontal and vertical hydrodynamics, mediated by the effect of "seiches" and internal waves, as of the real freshwater inflows to the bay (through channels and/or phreatic water) during these months of November to March.

Model sensitivity analyses indicate that the variable that can affect dissolved oxygen the most is water turbidity. After this one, in importance, are located phytoplankton biomass and its productivity, and sediment respiration, in case of lower layer, and at upper layer, wind speed, saturation irradiance for phytoplankton, and biochemical oxygen demand. Relative effect of increases in freshwater inflow for any of the three main channels that pour water (or all three at a time) on dissolved oxygen of the bay is very low if the whole year is considered, but instead, it is very higher if only September is taken into account, being the flow through the "Sequia de l'Ala" channel the one with a greater effect respect the flow of any of all three channels separately. Another idea that can be extracted and which is obtained from model calibration is that an important part (of up to 80%) of chlorophyll a in the lower layer at the end of summer is inactive photosynthetically.

The presence of macroalgae seems to have shifted the sign of oxygen balance in the lower layer. Thus, while by the end of the eighties the net annually averaged balance was negative ($-0.55 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$), the estimation of this balance within thin Ph.D. thesis (end of nineties, with macrophytes) produces a value of $+0.50 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$. As a whole, the ecosystem (including also physical processes) has oxygen incomes and outcomes quite balanced in annual basis (net balance lower than $+0.01 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$), for the whole bay and all water column. Only the benthic compartment of station "Tail" ("Cua") can be considered slightly heterotrophic in annually accumulated values.

The net balance of biological production in Alfacs bay to the end of the nineties was ca. $326 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, almost completely attributable to phytoplankton. Attending to Nixon (1995), Alfacs bay would remain situated in the category between mesotrophic and eutrophic bays. Besides, oxygen exportation to the atmosphere necessarily, and in the long run, represents a parallel exportation of carbon of around $110 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$; from which it is estimated that ca. $30 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$ are exported to open sea, and the rest, ca. $80 \text{ gC m}^{-2} \text{ y}^{-1}$, is what presumably is accumulated in the sediment.

From this thesis as a whole, it can be deduced that hypoxic situations are not caused by an only factor, isolated and identifiable, but for the coincidence in space and time of a set of conditions, as they could be high temperature, water column turbidity, high macrophyte biomass and sediment respiration and wind absence, among others. Hypoxic situation seems to be kept while these conditions do not substantially change and there is little deep water renewal, being by lack of advective flow by intrusion of salt water from the exterior, or by lack of non-advective flow with the upper layer. Finally, hypoxia decreases and can end up disappearing when either occasional strong winds or weaker winds but more continued, which break or erode water column stratification, or when there is deep water renewal by external marine water entrance, caused by, for instance, freshwater inflow through the channels.

From all what has been reported up to now, it can be deduced that the range of manoeuvre to reduce the risk of anoxia is low. Maybe the factor on which management action can be taken is the freshwater inflow to the bay. In this sense, a minimal discharge of freshwater reaching the bay has to be guaranteed, so that estuarine circulation does not dangerously diminish, especially in the more critical times of the year like at the end of summer. The more water is poured through any of the further channels from the mouth of entrance to the bay (like “Sèquia de l'Ala” channel), the more difficult is the occurrence or maintenance of hypoxic events.

Annexos

**Annex A. Conseqüències de les davallades
d'oxigen**

Annex A. Conseqüències de les davallades d'oxigen

Tal i com s'ha citat a la introducció de la tesi, les davallades d'oxigen dissolt dels sistemes marins costaners porten associades conseqüències a molts nivells, tant ecològics (es comenten primer) com econòmics (es comenten breument al final).

Conseqüències sobre les característiques físico-químiques de l'aigua

Les davallades d'oxigen dissolt fan baixar els potencials redox amb el que es preserva més la matèria orgànica en ambients anòxics, especialment en sediments. A més, sol haver majors concentracions de nutrients, especialment en la forma reduïda com NH_4^+ per les espècies de nitrogen; el pH i l'alcalinitat són més alts. També es solen alterar els estats d'oxidació d'ions metàl·lics, i sol existir precipitació de sulfurs, que són tòxics (Richards 1965). Existeix un fraccionament d'isòtops de nitrogen durant el procés anòxic (Richards i Benson 1961). Es va observar que hi havia una major taxa de $^{15}\text{N}^{14}\text{N}$ respecte $^{14}\text{N}_2$ a les aigües anòxiques del canó submergit de Cariaco (Costa Caribènia de Veneçuela) i Damsfjord (Noruega) que en el nitrogen atmosfèric o que en el nitrogen contingut en aigua de mar portadora d'oxigen en concentracions més properes a saturació.

Conseqüències sobre la biogeoquímica del sediment

Un augment de la deposició orgànica i de la hipòxia en la part inferior de la columna d'aigua pot generar els següents d'efectes en els sediments (Jørgensen i Richardson 1996):

- desplaçament en l'equilibri d'oxidants cap a mineralització anaeròbica i reducció del sulfat,
- activitat reduïda de la fauna bentònica i un canvi cap a major limitació de la difusió de fluxos de soluts, en general.
- acumulació de sulfurs metàl·lics i de H_2S en aigua intersticial,
- inhibició de la nitrificació i alliberament preferent d'amoni.
- alliberament de fòsfor lligat a Fe(III) a la columna d'aigua.
- alliberament d' H_2S en cas d'esgotament sever d'oxigen,
- major enterrament de carboni i nitrogen orgànics al sediment.

Per altra banda, també s'ha descrit que poden existir altres relacions més complexes entre davallades d'oxigen i la biogeoquímica del sediment, a través del canvi en el comportament d'alguns organismes del sediment. Un exemple d'aquestes interaccions complexes descriu que hipòxia o anòxia prolongades permet a bacteris sulfato-reductors (que normalment es troben més profunds en sediments durant normòxia) de sobreviure en la superfície on poden produir concentracions de sulfhídric potencialment letals (Jørgensen 1980, Bagarinao 1992) i alterar altres cicles geoquímics.

Conseqüències sobre els organismes i l'estructura de la comunitat

Tot un ventall ben ampli de conseqüències sobre els organismes marins s'han descrit a la literatura: mortalitats massives d'animals (Brongersma-Sanders 1957, Richards 1965, Niermann 1990); canvis fisiològics (Mangum i van Winkle 1973, Butler *et al.* 1978, Kapper i Stickle 1987, Herreid 1980, Warren 1984, Diaz i Rosenberg 1995); canvis en la reproducció (Brungs 1971, Rombough 1988); canvis en el comportament (Hagerman i Szaniawska 1986, Kramer 1987); reducció de la mida mitja dels individus (Weigelt 1991)

S'ha descrit també disminució en biomassa, abundància i diversitat d'espècies en ecosistemes del Mar del Nord, el Kattegat i el Mar Bàltic degudes a hipòxia i anòxia (Weigelt i Rumohr 1986, Westernhagen *et al.* 1986, Rosenberg i Loo 1988, Andersin *et al.* 1990, Niermann *et al.* 1990, Josefson i Jensen 1992, Rosenberg *et al.* 1992). Per altra banda és d'esperar una selecció d'espècies resistents a la deficiència d'oxigen dissolt, com s'ha pogut comprovar al llarg del segle XX a Dinamarca (Leonhard i Varming 1992).

Conseqüències sobre els fluxos d'energia

L'altre conseqüència ecològica en els sistemes estressats per l'oxigen que afecta als fluxos d'energia en l'ecosistema és que el cíclic de nutrients i les transferències d'energia esdevenen a polsos. Abans de la hipòxia la principal força creadora de polsos en aquests sistemes era l'estacionalitat, però amb la hipòxia incrementa la magnitud del pols i s'escurça l'interval de temps en el que succeeix. A més, l'organització de la comunitat durant períodes d'estrès tendeix a disminuir o es retorna a un estadi anterior pioner de la successió ecològica (Pearson i Rosenberg 1978, Josefson i Jensen 1992, Pearson i Rosenberg 1992).

Habitats estressats per baixes concentracions d'oxigen de forma periòdica o estacional afavoreixen genotips que maximitzen flux d'energia a creixement i reproducció, limitant pèrdues d'energia al manteniment o tolerància a llarg termini de l'estrès (Odum 1971).

Conseqüències sobre la successió ecològica

Diaz i Rosenberg (1995) van formular un model conceptual sobre com interacciona la hipòxia amb els estats de successió de la comunitat o la complexitat de la organització. Segons aquest model (Figura 0.1) les comunitats dels sistemes que comencen a experimentar hipòxia aperiòdica no estan acostumades a baixes concentracions d'oxigen, pel que la mortalitat d'individus i l'eliminació d'espècies és important, especialment en estadis avançats de la successió ecològica. Les hipòxies aperiòdiques són precursoras del desenvolupament de comunitats resistents a la hipòxia.

Quan el sistema experimenta hipòxies periòdiques o estacionals, les comunitats han efectuat la majoria dels seus canvis estructurals i d'organització. Les comunitats que es troben en sistemes que presenten hipòxies periòdiques (períodes de dies a setmanes repetits) ja es troben preadaptades a

l'estrès i mostren petits canvis durant o just després successos hipòxics. Amb hipòxia estacional de mesos de durada, malgrat la preadaptació, les mortalitats massives ocorren sovint amb la quasi completa eliminació de la macrofauna en les comunitats en tots els estadis de successió.

Els sistemes amb hipòxia persistent són ocupats només per comunitats d'estadis primerencs de la successió. La diversitat, abundància i biomassa d'aquestes comunitats decreix al llarg de gradients estables d'hipòxia creixent fins al punt d'anòxia estable persistent, que es caracteritza per l'absència de macrofauna.

Les hipòxies severes de llarga durada o persistents i les anòxies indueixen un creixement retardat i poc èxit reproductiu, generant fallides de recolonització i habitats que són mancats de macrofauna. Excepcions a això són entre altres les àrees altament eutròfiques on hi ha de manera accessible abundant quantitat de matèria orgànica làbil. Aquesta combinació d'hipòxia i matèria orgànica crea un habitat extrem únic en els habitats marins i estuaris que manté una comunitat de baixa diversitat i flux alt d'energia.

No existeix macrofauna en ambients persistentment anòxics. Per hipòxies severes o anòxies sembla no existir mecanismes de supervivència a llarg termini. Malgrat algunes espècies semblen exhibir tolerància a l'anòxia a llarg termini, no arriben a completar el seu cicle de vida en ambients severament hipòxics o anòxics.

Conseqüències econòmiques

Des de l'òptica merament econòmica a curt termini, es pot comentar que les poblacions d'algunes espècies d'interès comercial, com per exemple la llagosta a Noruega, s'han vist molt reduïdes per efecte de les hipòxies (Rosenberg *et al.* 1992). De forma general, podem dir que es veuen afectades totes aquelles espècies d'interès comercial que són sensibles a les davallades en les concentracions d'oxigen dissolt, pel que els pescadors deixen de trobar poblacions prou abundants per a compensar les despeses econòmiques que comporta aquesta explotació dels recursos pesquers.

Bibliografia

Andersin, A. B., *et al.*, 1990. Zoobenthos. *Second periodic assessment of the state of the marine environment of the Baltic Sea, 1984-1988, Background document*, 35B: 211-275.

Bagarinao, T., 1992. Sulfide as an environmental factor and toxicant: tolerance and adaptations in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology*, 24 21-62.

Brongersma-Sanders, M., 1957. "Mass mortality in the sea", a *Treatise on marine ecology and paleoecology*, 1, 941-1010. Waverly Press, Baltimore.

Brungs, W. A., 1971. The distribution of the Galatheid crab *Munida quadrispina* (Benedict 19202) in relation to oxygen concentrations in British Columbia fjords. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 81 1-20.

Butler, P. J., *et al.*, 1978. Respiratory and circulatory changes in the lobster (*Homarus vulgaris*) during long term exposure to moderate hypoxia. *J. Exp. Biol.*, 73 131-146.

Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.

Hagerman, L. i Szaniawska, A., 1986. Behaviour, tolerance, and anaerobic metabolism under hypoxia in the brackish-water shrimp *Crangon crangon*. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 34 125-132.

Herreid, C. F., 1980. Hypoxia in invertebrates. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 67A 311-320.

Jørgensen, B. B., 1980. Seasonal oxygen depletion of in the bottom waters of a Danish fjord and its effects on the benthic community. *Oikos*, 34 68-76.

Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.

Josefson, A. B. i Jensen, J. N., 1992. "Effects of hypoxia on soft-sediment macrobenthos in southern Kattegat", a *Marine Eutrophication and Population Dynamics*, 21-28. Olsen & Olsen, Fredesborg, Denmark.

Kapper, M. A. i Stickle, W. B., 1987. Metabolic responses of the estuarine gastropod *Thais haemastoma* to hypoxia. *Physiol. Zool.*, 60 159-173.

- Kramer, D. L., 1987. Dissolved oxygen and fish behavior. *Environ. Biol. Fish.*, 18 81-92.
- Leonhard, S. i Varming, S., 1992. Bundfauna i Lillebælt 1911-1990. *Lillebæltsamarbejdet*: 185.
- Mangum, C. i van Winkle, W., 1973. Responses of aquatic invertebrates to declining oxygen tensions. *American Zoologist*, 13 529-541.
- Niermann, U., 1990. Oxygen deficiency in the southeastern North Sea in summer 1989:
- Niermann, U., *et al.*, 1990. The recovery of benthos following the impact of low oxygen content in the German Bight. *Neth. J. Sea Res.*, 25 (1-2): 215-226.
- Odum, H. T., 1971. Environment, power, and society:
- Pearson, T. H. i Rosenberg, R., 1978. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography and Marine Biology: an Annual Review*, 16 229-311.
- Pearson, T. H. i Rosenberg, R., 1992. Energy flow through the SE Kattegat: a comparative examination of the eutrophication of a coastal marine ecosystem. *Netherlands Journal of Sea Research*, 28 317-334.
- Richards, F. A., 1965. "Anoxic Basins and Fjords", a *Chemical Oceanography*, 1, 611-645. Academic Press, London.
- Richards, F. A. i Benson, B. B., 1961. *Deep Sea Res.*, 7 254.
- Rombough, P. J., 1988. "Respiratory gas exchange, aerobic metabolism, and effects of hypoxia during early life", a *The physiology of developing fish*, XI, 59-161. Academic Press, San Diego.
- Rosenberg, R. i Loo, L. O., 1988. Marine eutrophication induced oxygen deficiency: Effects on soft bottom fauna, western Sweden. *Ophelia*, 29 (3): 213-225.
- Rosenberg, R., *et al.*, 1992. Hypoxia, salinity and temperature as structuring factors for marine benthic communities in a eutrophic area. *Netherlands Journal of Sea Research*, 30 121-129.
- Warren, L. M., 1984. How intertidal polychaetes survive at low tide. *First International Polychaete Conference*: 238-253.

Weigelt, M., 1991. Short- and long-term changes in the benthic community of the deeper parts of Kiel Bay (Western Baltic) due to oxygen depletion and eutrophication. *Meeresforsch*, 33 197-224.

Weigelt, M. i Rumohr, H., 1986. Effects of wide-range oxygen depletion on benthic fauna and demersal fish in Kiel Bay 1981-1983. *Meeresforsch*, 31 (2): 124-136.

Westernhagen, H. V., *et al.*, 1986. Sources and effects of oxygen deficiencies in the south-eastern North Sea. *Ophelia*, 26 457-473.

**Annex B. Badies i estuaris d'arreu del Món,
comentats al llarg de la tesi doctoral**

Annex B. Badies i estuaris d'arreu del Món, comentats al llarg de la tesi doctoral

La importància relativa de la marea, l'estratificació, els fluxos d'aigua dolça entrants, l'evapotranspiració, etc., varia en cada cas de sistema, pel que es comenten tot seguit algunes de les peculiaritats de cadascun d'ells a partir del que s'ha pogut trobar a la literatura científica recent.

Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i Mar Bàltic (Nord d'Europa)

Aquí trobem varis sistemes marins costaners que periòdicament poden presentar problemes de manca d'oxigen dissolt (Figura B.1). El Bàltic és un cos d'aigua tancat, i el Mar de Belt, el Kattegat i l'Skagerrak poden ser considerats com la seva extensió de sortida cap al Mar del Nord. Tant en Bàltic com en el Kattegat en general el flux mareal és negligible i l'aigua es troba verticalment estratificada per forts gradients de salinitat, tenint un intercanvi d'aigua a prop del fons molt reduït (Rosenberg 1985). Al SE del Kattegat, per exemple, la salinitat superficial varia de 15 a 30 psu (de Sud a Nord). L'aigua de fons entra pel Nord com aigua d'Skagerrak de 32-34 psu. L'haloclina es situa cap als 15 m de fondària, malgrat la seva posició no és fixa degut al flux variant del Bàltic i a vents locals. La barreja vertical està governada per l'acció del vent, oscil·lant entre velocitats de 0.25 m d-1 de mitjana i 0.1 m d-1 de mínima estival (Rydberg *et al.* 1990). La badia de Laholm i la badia d'Århus són dues badies de fondària similar en aquesta àrea, la primera en la costa sueca, i la segona en la danesa.

Badia d'Århus

Inclosa en l'àrea del Kattegat (Figura B.1), té prop de 20 m de fondària màxima i 0.4 m de rang mareal (Jørgensen i Richardson 1996). Presenta diferències de salinitat entre superfície i fons entre 10 psu a primavera com a valor màxim i 5 psu a l'estiu. Aquestes diferències són a causa de les aigües estivals profundes de salinitat molt elevada que procedeixen de d'aigua del Mar del Nord de 32 psu (que per al mar del Nord i l'àrea de l'Skagerrak són valors molt alts dins el seu rang de salinitats).

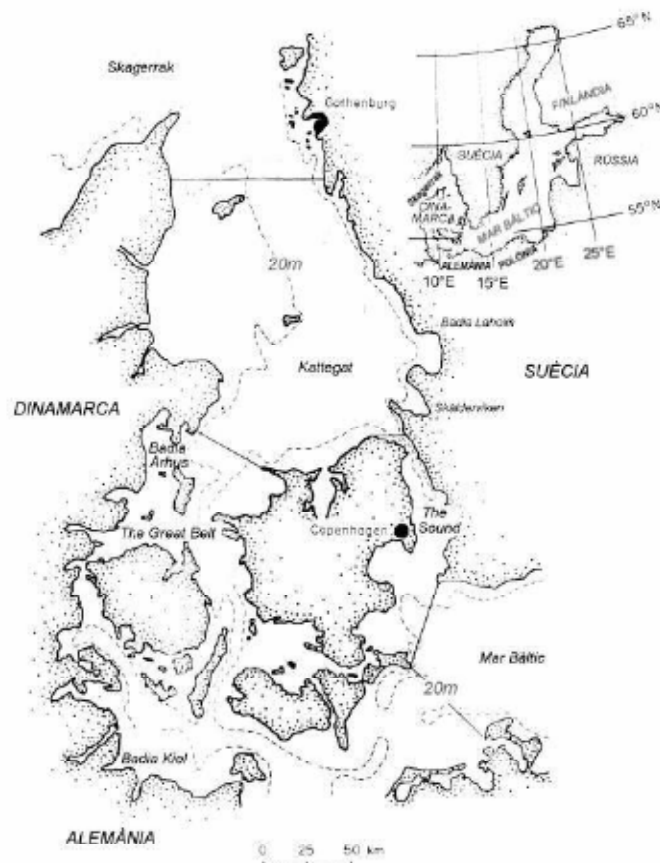


Figura B.1 Localització de Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i Mar Bàltic, Europa del Nord (a partir de Anderson i Rydberg 1988).

Fiords

Els Fiords són intrusions oceàniques a terra a causa de l'acció geològica de glaceres sobre el marge continental costaner, i representen un tipus especial d'estuaris, independentment de si són micromareals o no (Figura 1.1). La majoria es troben a latituds altes: a l'Hemisferi Nord per sobre dels 50 N a Canadà, EUA, Groenlàndia, Escandinàvia, Escòcia i Svalbard; per sota dels 40 S, a Perú, Xile i Nova Zelanda.

Els Fiords de la Península Escandinava (especialment els de la costa de Noruega) són profunds, amb fondàries màximes de diversos centenars de metres, amb una precipitació anual aproximada entre 1100mm i 2200 mm als de la costa de Noruega (que rep la influència del corrent marí del Golf de Mèxic), però força inferior als de Suècia i Finlàndia (500-600 mm a⁻¹). S'ha demostrat que l'estrès del vent és un factor important de forçament hidrodinàmic en aquests fiords (Leth 1995). Un exemple és el fiord de Trondheim, situat a la part central de Noruega (Figura B.2), amb 135 km de llarg, fondàries mitjana i màxima de 195 m i 617 m, respectivament, i la del ressalt d'entrada, a 195 m (Sakshaug i Myklestad 1973). El fiord de Trondheim es comporta com un estuari macromareal, amb una amplitud mareal de 1.8 m que causa una intensa barreja de les aigües dolces i salades, essent la capa superficial de

sortida d'entre 5 i 15 m de gruix i entre 25 i 33 psu de salinitat, compensada per un corrent inferior d'entre 30 i 100 m (Jacobson 1983).

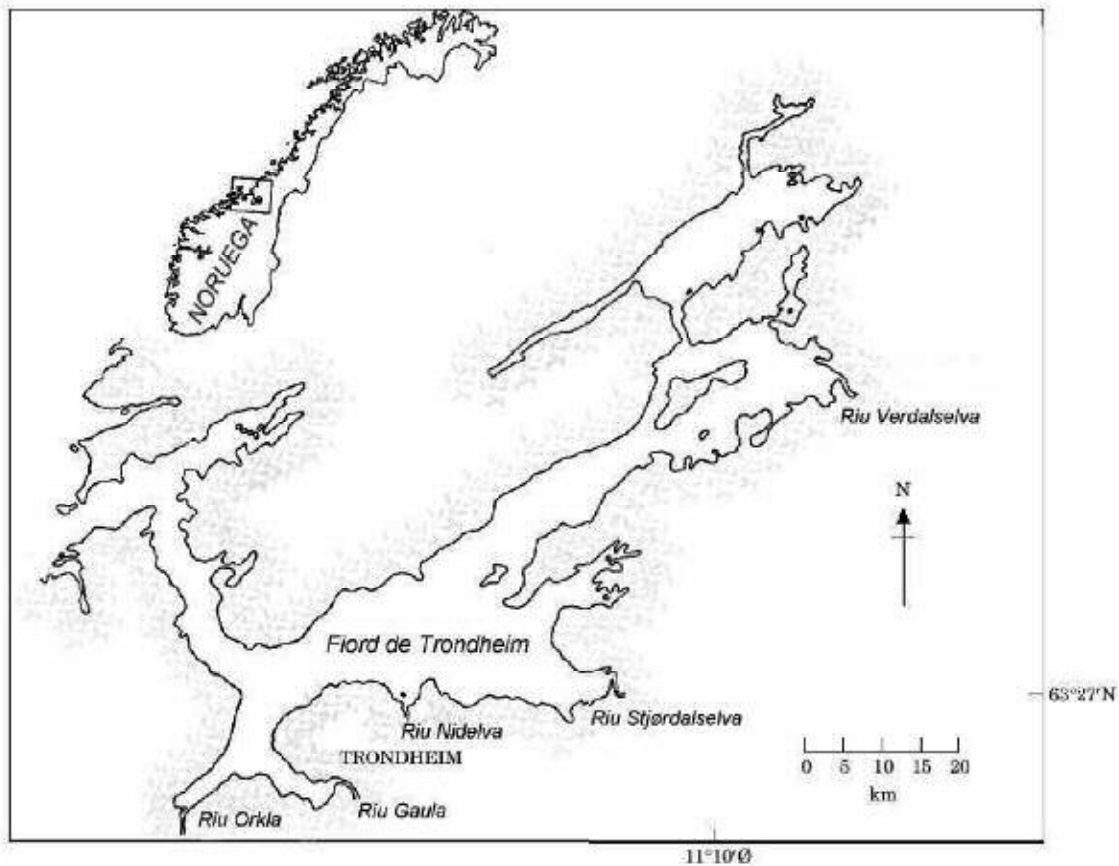


Figura B.2. Localització del fiord de Trondheim, a la part central de Noruega (a partir de Öztürk et al. 2002)

Un altre cas de fiord ben documentat recentment, i lleugerament diferent dels fiords escandinaus, és el Doubtful Sound, a la costa est de Nova-Zelanda (Figura B.3). És el més profund dels fiords de l'illa, amb 200 m de fondària mitjana, 434 m de fondària màxima i 6750 mm de precipitació anual (Stanton i Pickard 1981). La característica notable d'aquest sistema costaner és l'acoblament entre el la seva circulació hidrodinàmica en els seus primers 10 m de fondària superficials (que funcionen com a estuari bicapa amb la picnoclina al voltant dels 4 m) i el doble efecte de les entrades d'aigua dolça i els temporals de vent (Gibbs et al. 2000). El fiord Doubtful Sound rep de l'ordre de $450 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de forma constant d'una planta hidroelèctrica per un costat, que és de l'ordre de dos a tres vegades més que els aportes per escorrentia superficial de la conca, pel que l'aigua de la planta hidroelèctrica és la principal responsable del manteniment de l'estratificació de la bicapa superior. La resposta de la capa intermitja del fiord als vents i pluja és menys evident, malgrat s'ha demostrat que en els períodes de forts temporals la hi afecten significativament malgrat sovint promovent flux net d'aigua en sentits oposats. Els vents bufen quasi exclusivament al llarg de l'eix Oest-Est del fiord condicionats per l'orografia local, amb el que el seu efecte és d'erosionar l'estratificació vertical, redistribuir lateralment el flux de flotabilitat (per diferències de densitat) i d'empènyer l'aigua terra endins en termes absoluts.

Les pluges que porten associades generalment els mateixos temporals de vent generen un gradient de densitat longitudinal que potencia la circulació neta en sentit oposat al del vent.

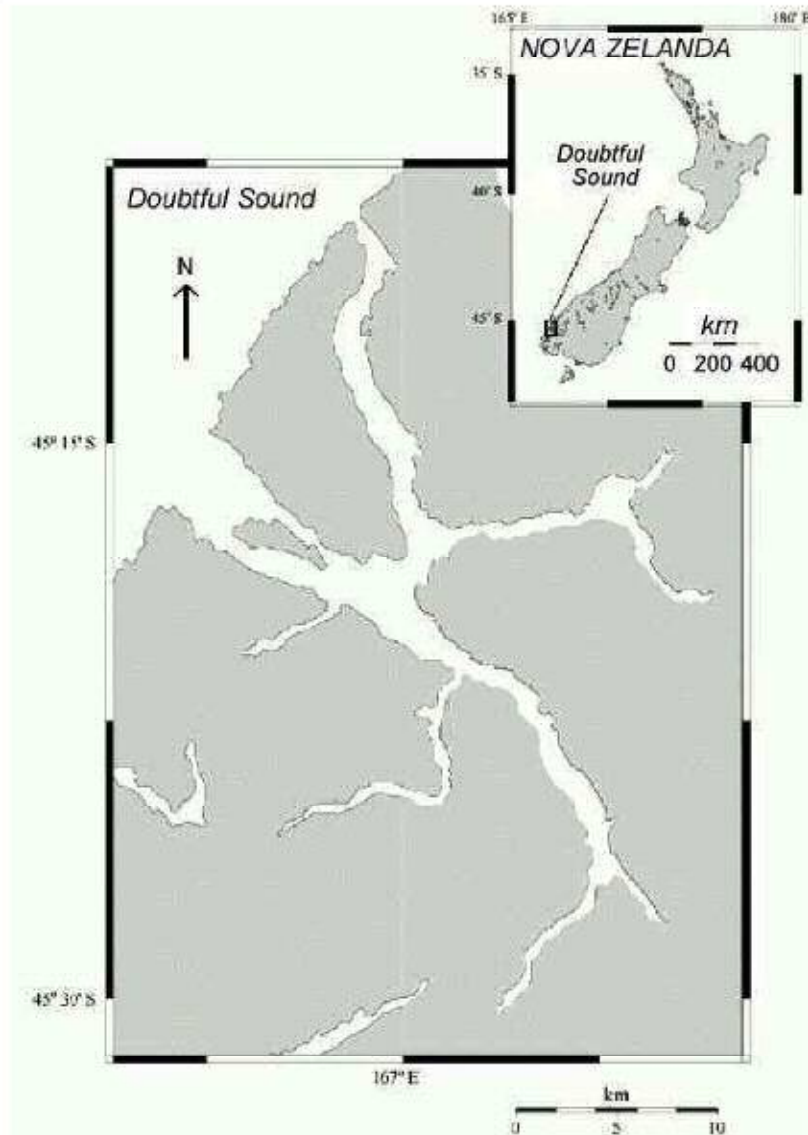


Figura B.3. Localització del fiord Doubtful Sound, Nova Zelanda (a partir de Lusseau *et al.* 2003)

Badia de Chesapeake i els seus subestuaris

La Badia de Chesapeake (Virginia, EUA) és l'estuari més gran dels EUA (Figura B.4) amb més de 150 rius que hi desemboquen i un dels més estudiats del món, en el que des de fa dècades estan seguint l'evolució de la dinàmica de la seva concentració d'oxigen dissolt. S'ha descrit per exemple que des dels anys 50 la seva hipòxia està més relacionada amb els cabals d'entrada d'aigua dolça que amb cap efecte antropogènic específic, a causa del seu doble efecte sobre la càrrega de nutrients que hi transporta i a que els augments d'entrada d'aigua dolça a l'estuari suposen un increment de l'estratificació i per tant una reducció de l'intercanvi vertical d'oxigen. En els tres subestuaris més propers a mar obert (els dels rius Rappahannock, York i James) es van trobar valors de concentració d'oxigen inferior al 50% de saturació durant el 75%, 50% i 2% de les campanyes en que la temperatura de l'aigua era superior als 20 C. (Kuo i Neilson 1987). El cas d'aquest últim estuari

afluent a la badia de Chesapeake mereix especial atenció, atès que malgrat ser el que té una major entrada d'aigües residuals també és el que presenta un major moviment de les aigües de fons. En un estudi sobre l'evolució al llarg de 8 anys de 28 variables relacionades amb la qualitat de l'aigua a la Badia de Chesapeake es va trobar que el 80% de les variables analitzades en els estuaris afluents i prop del 50 % de les del curs principal de la Badia mostraven relacions significatives amb el flux d'aigua (Alden III 1997). Aquestes relacions explicaven fins el 55% de la variància total trobada en el conjunt dels 8 anys per algunes de les variables dels estuaris afluents. En aquest estudi va ressaltar que l'estuari del Riu James, que té el flux d'aigua més important de tots tres, té el major percentatge de variables que manifesten estar estadísticament relacionades amb el flux d'aigua.



Figura B.4 Localització de la badia de Chesapeake i dels seus estuaris, Virginia, EUA (a partir de Harding 1994).

Estuari del Riu James (Virginia, EUA)

Té 12m de fondària màxima al canal principal, i la dels marges laterals és de l'ordre de 4m. A nivell hidrodinàmic, existeix un control dual del flux net horitzontal (flux submareal) per part del seu component barotròpic i del seu component baroclínic. El component del flux submareal induït per la marea (component mareal o barotròpic) provoca el moviment net de l'aigua en direcció de terra cap al mar en el canal principal de l'estuari i en sentit de mar cap a terra per les vores someres. I l'intercanvi hídric induït per densitat (component de densitat o baroclínic) provoca moviment net d'aigua en sentit

contrari al del flux barotròpic: de mar cap a terra en el canal principal i de terra cap a mar per les vores someres. És a dir, que el component de mareal i el component de densitat del flux net horitzontal competeixen entre si en sentit oposat. Durant marees màximes ("spring tides") el component mareal (barotròpic) del flux net horitzontal i la seva barreja vertical superen l'estratificació per densitat provocada per les descàrregues d'aigua dolça i per tant el seu flux per densitat (baroclínic) associat. Ara bé, durant les marees mínimes ("neap tides") el component mareal (barotròpic) del flux net horitzontal i la seva barreja vertical són febles i per tant és el component baroclínic del flux el que predomina i supera amb escreix al produït per la marea (Li *et al.* 1998).

Badia de Tomales (Califòrnia, EUA)

És una badia estuària mediterrània somera de prop de 20 km de llarg, 1.4 km d'ample, 3.1 i 6 m de fondàries mitjana i màxima i comunica amb el Pacífic a través d'una petita obertura a la barra de sorra que la separa de l'oceà (Figura B.5). Aquesta barra de sorra és conseqüència de períodes llargs sense flux del riu. La forma allargada i estreta de la badia permet que es pugui simplificar l'estudi del seu flux d'aigua al de la seva component al llarg de l'eix principal, i en alguns models descriptius de l'ecosistema s'ignoren els fluxos laterals i l'efecte del vent sobre la hidrodinàmica (Hearn i Largier 1997). La circulació de la Badia de Tomales és controlada fonamentalment pel transport horitzontal a través de la badia interior. L'aigua dolça entra per la capçalera de la badia interior en major part i lateralment per la badia exterior, significant a l'hivern entre l'1% i el 18% del total del volum d'aigua de la badia interior, però en general s'accepta que en aquesta estació climatològica la circulació ve determinada pel flux del riu. A l'estiu les entrades pel riu són dos ordres de magnitud inferiors (ó 0.3 mm d-1 promitjat per a l'àrea de la badia interna). L'evaporació neta domina el període estival amb un 5% del volum de la badia interior, o sobre 1 mm d-1. Això produiria un increment de salinitat de l'ordre de 0.01 per cada dia que una porció de la columna d'aigua es trobés barrejada a la badia. És a dir que en aquesta altra estació climatològica la circulació ve determinada en primer grau per gradients de densitat a causa d'hipersalinitat, parcialment compensats per l'escalfament, i juntament amb el "flux de flotabilitat" controlen la dinàmica estuària durant aquest període deficitari d'aports nets d'aigua dolça. Per últim, dir que el corrent mareal màxim arriba a 20 cm s-1 en el canal principal de la badia però molt inferiors en la resta de l'estuari: les marees són barrejades, amb un rang mitjà d'1m (Hearn 1998).

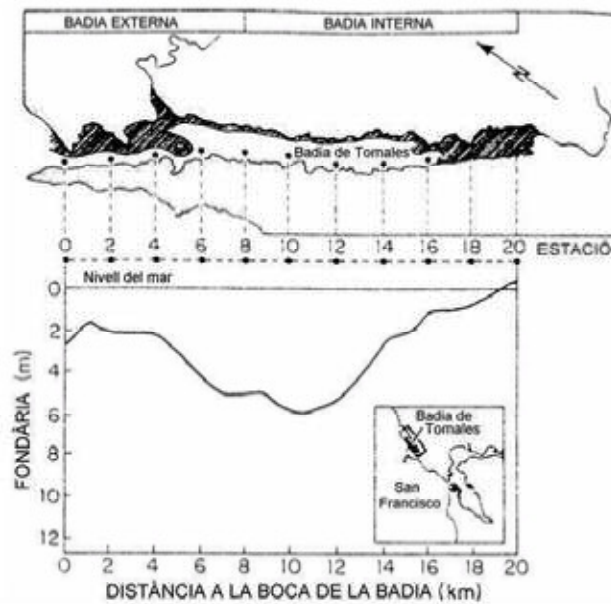


Figura B.5 Localització de la badia de Tomales, Califòrnia, EUA (a partir de Smith i Hollibaugh 1997).

Badia de San Francisco

És una badia micromareal de clima mediterrani a la zona de Califòrnia, EUA, d'uns 40*10km de superfície, dividida en la badia Nord i la badia Sud pel canal de sortida a mar obert sota el famós Golden Gate.

Badia de Tampa (Florida, EUA)

Situada a la costa central oest de Florida (Figura B.6), amb mitjanes de salinitat anuals típicament amb valors entre 30 i 32 psu, i de temperatura, entre 15 i 34 °C (Bell 1999). La badia ocupa 5700 Km², té una fondària mitjana de 3.5 m (Lewis *et al.* 1998), i és un altre dels llocs de referència d'estudis de qualitat de l'aigua, on l'eutrofització ha esdevingut un problema prioritari a resoldre (Wang *et al.* 1999), que ja ha influït en la regressió de les praderies de *Zostera marina* com a resultat de l'elevada concentració de fitoplàncton i terbolesa de la columna d'aigua (Morrison *et al.* 1997).



Figura B.6 Localització de la badia de Tampa, Florida, EUA (a partir de Wang et al. 1999).

Estuaris a Austràlia Occidental (Austràlia)

Em aquest grup es troben seguint la direcció Nord-Sud de la costa oest australiana l'estuari del Rius Swan i Canning, el sistema badia-estuari de Peel-Harvey, les rades Leschenault, Hardy, Nornalup, Wilson i el port Oyster (Figura B.7). El més accessible per la literatura científica actual és el segon, raó per la qual és que prenc com a exemple per comentar.

La badia-estuari Peel-Harvey

És un conjunt mediterrani somer d'un estuari (Harvey) que es comunica posteriorment amb una badia (Peel "inlet") abans de travessar el canal estret que els dona accés a l'oceà Índic (Figura B.7). La precipitació anual és de l'ordre de 950mm que cauen fonamentalment a l'hivern, i els anys amb hiverns especialment plujosos ha patit de blooms primaverals de cianobacteris, fins que es van construir l'any 1993 un segon canal de comunicació amb l'exterior en la zona entre l'estuari i la badia posterior per tal d'incrementar l'intercanvi d'aigua amb l'oceà, i aquesta va ser la única manera d'eradicar definitivament els periòdics blooms i les hipòxies associades. Aquestes hipòxies a més, es donen precisament quan s'agreuja l'estratificació salina (finals d'hivern-primavera), i depèn no només de la barreja vertical sinó del grau d'esforç vertical dels corrents (Hearn i Robson 2001). De fet, el seu funcionament hidrodinàmic ha estat recurrentment comparat amb el de la badia de Tomales (veure més a munt), si bé la hipersalinitat que manifesta aquesta última sol ser d'1-2 psu mentre que la de l'estuari Harvey previ a l'obertura del segon canal de comunicació amb mar obert podia arribar fins a 10 psu (Hearn i Lukatelich 1990). Aquesta hipersalinitat provoca un funcionament d'estuari invertit excepte en els sistemes en que només tenen unes poques unitats d'hipersalinitat (diferència entre les unitats de salinitat de dins l'estuari respecte les de mar obert) com la badia de Tomales, gràcies a que

el balanç tèrmic positiu que acompanya aquests indrets mediterranis pot equilibrar les hipersalinitats aconseguint mantenir-se quasi-neutre amb una inversió mínima. No passava així amb l'estuari Harvey, que funcionava com a estuari invertit a l'estiu i com a estuari positiu fortament dominat pel flux del riu a l'hivern, en que podia presentar unes poques unitats de salinitat.

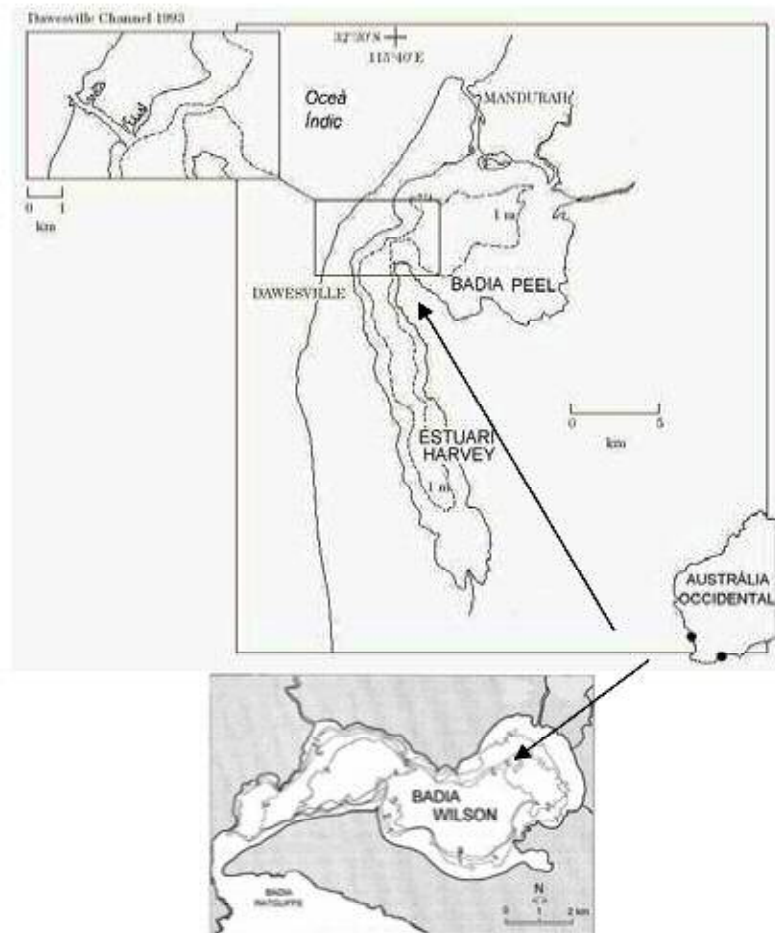


Figura B.7 Localització dels estuaris mediterranis d'Austràlia Occidental, Austràlia (a partir de Largier et al. 1996, Hearn 1998).

La badia "Wilson Inlet"

Aquest altre sistema micromareal mediterrani mereix un especial comentari per similitud ambiental amb la Badia dels Alfacs i per la proximitat en els mètodes de mesura del metabolisme d'oxigen del sediment emprats en ambdós sistemes, com s'explicarà més detalladament en un proper capítol. La badia Wilson (Figura B.7) té descrita una oscil·lació mareal de prop de 20cm (Ranasinghe i Pattiaratchi 1998), i presenta una precipitació anual de prop de 1100 mm, distribuïts fonamentalment a l'hivern amb pluges torrencials de fins a 60mm d-1, malgrat també es troben descrites pluges torrencials estiuenques de forma ocasional. El balanç hídric atmosfèric indica que la precipitació mitjana mensual supera a la de l'evaporació entre Maig i Setembre (tardor i hivern austral) mentre que els 7 mesos restants el balanç és invers. Els aportos anuals d'aigua dolça pels rius de la conca són de

$207 \times 10^6 \text{ m}^3$, el 80% dels quals entra durant els mesos hivernals a causa de les pluges d'aquesta temporada (Hodgkin i Clark 1988).

L'estuari de Palmiet, (Província del Cap, Sud-àfrica)

Els estuaris mediterranis sud-africans solen ser de petites dimensions, fondàries màximes inferiors als 10m i molts d'ells amb les zones de comunicació amb mar obert tancades temporalment per barres de sorra durant alguns mesos l'any de forma natural (Allanson 2001). L'estuari de Palmiet, concretament, es troba situat a 34 S, té només 1.67 km de llarg, 2m de fondària al seu canal principal i 4m de fondària màxima (Figura B.8), però malgrat les seves reduïdes dimensions va ser escollit com a estuari representatiu dels estuaris protegits per alfacs en la regió de pluges hivernals de la província del Cap de Sud-àfrica (Largier i Taljaard 1991). És un estuari pristi d'aigües netes, en el que s'ha descrit tant un funcionament hidrodinàmic amb estructura bicapa típica (Branch i Day 1984, Taljaard *et al.* 1986) o amb estructura tricapa com la dels fiords noruecs (Largier 1986), i sense tancament de la boca de comunicació amb l'exterior. Als hiverns humits funciona com un estuari positiu. La seva conca hidrogràfica muntanyenca rep el pas hivernal de fronts freds de latituds mitjanes, que flueix ràpidament en avingudes immediates pel riu cap al mar passant per l'estuari. Les fluctuacions en aquest flux del riu dominen la variabilitat del flux submareal de l'estuari a l'hivern, mentre que a l'estiu la dominància és marina. Durant aquests mesos estivals secs, el gradient longitudinal de densitat es redueix fins a zero o fins i tot es pot arribar a invertir, generant una alta taxa de residència de l'aigua (Harcourt Baldwin 2000) Aquest patró de circulació hivernal - estival és el mateix que el descrit a la Badia de Tomales, i s'ha arribat a voler assignar com el patró dels estuaris mediterranis (Largier *et al.* 1997, Hearn 1998), si bé en casos com el de la badia dels Alfacs no es pot aplicar, a causa de la seva diferent climatologia, tal i com s'ha comentat prèviament al Capítol 1.

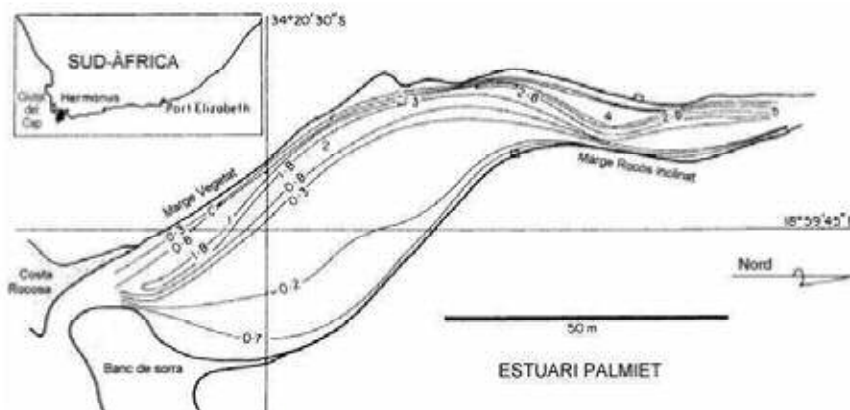


Figura B.8 Localització de l'estuari de Palmiet, Sud-àfrica (a partir de Largier i Taljaard 1991).

Badia portuària de Tolo (Hong Kong, Xina).

Situada al NE dels nous territoris de Hong Kong a prop del límit Nord del Mar del Sud de la Xina (Figura B.9), és una badia portuària estuariana subtropical sense rius importants que hi vessin les seves aigües. El cos d'aigua principal fa 16 km de llarg i 3 km d'ample, i 12m de fondària mitjana. Té una entrada en forma de coll d'ampolla que junt amb la seva reduïda oscil·lació mareal mitjana de menys d'un metre li confereixen característiques sovint eutròfiques a causa de els incrementats aportes de nutrients antropogènics i que les corrents mareals no són prou importants per renovar la seva aigua, en general. El clima és tropical amb Monsons, amb precipitació anual entre 1900 i 2200 mm, el 70% dels quals cau de Maig a Setembre. Els estius són secs i humits amb vents predominants del SW, mentre els hiverns són frescos i secs amb vents predominants del NE. Les temperatures mitjanes de l'aigua superficial oscil·len entre 15 C al Gener i 30.5 C al setembre. La precipitació anual mitjana és de l'ordre de 2134 mm si bé una porció important es troba associada amb l'estació de ciclons o tifons tropicals entre Juliol i Setembre, que va acompanyada d'una estació seca posterior entre Novembre a Març (Hodgkiss i Yim 1995). De fet, en aquest port natural s'han realitzat nombrosos estudis de tendències temporals de variables fisico-químiques, estudis del seu fitoplàncton, model hidrodinàmics acoplats als químics i biològics, etc., que es comentaran en els moments oportuns durant els propers capítols de la següent tesi. La badia presenta una marea mitjana de menys d'1 m, i la fondària general és d'entre 5 i 10 metres a la major part de la badia interna. El seu fitoplàncton està més limitat per nitrogen que per fòsfor (Chau i Sin 1992). Sol haver-hi (o com a mínim als anys 80) mortalitat massiva d'organismes bentònics de forma regular a la part interior de la badia portuària, i és atribuïda a la desaparició estival d'oxigen a causa de l'eutrofització. La comunitat bentònica es recupera aviat per una ràpida recolonització hivernal (Wu 1982). De totes formes aquesta badia estuariana presenta recurrents blooms de dinoflagelats tòxics, la freqüència dels quals va incrementar significativament als anys 80 amb 69 incidents enregistrats només des de 1980 fins a 1986. Es va identificar més de 20 organismes responsables. A més, l'any 88 van tenir un blooms persistents de *Gonyaulax polygramma* desde Febrer a mitjans de Maig que va acabar en una anòxia severa i una mortalitat massiva de peixos el 5 de maig, relacionada amb el dèficit d'oxigen (Lam i Ho 1989). En general la badia es troba estratificada com un estuari bicapa típic, i s'associa aquestes condicions eutròfiques a finals d'estiu amb una molt reduïda renovació de la capa d'aigua fonda a la part més interna de la badia de Tolo. La piconclina està potenciada tant per la major precipitació estival (haloclina) com per la seva major irradiància solar (termoclina), i en ambdós casos contribueixen a disminuir la connexió i l'intercanvi vertical d'aigua entre les dues capes (Chau i Jin 1998).

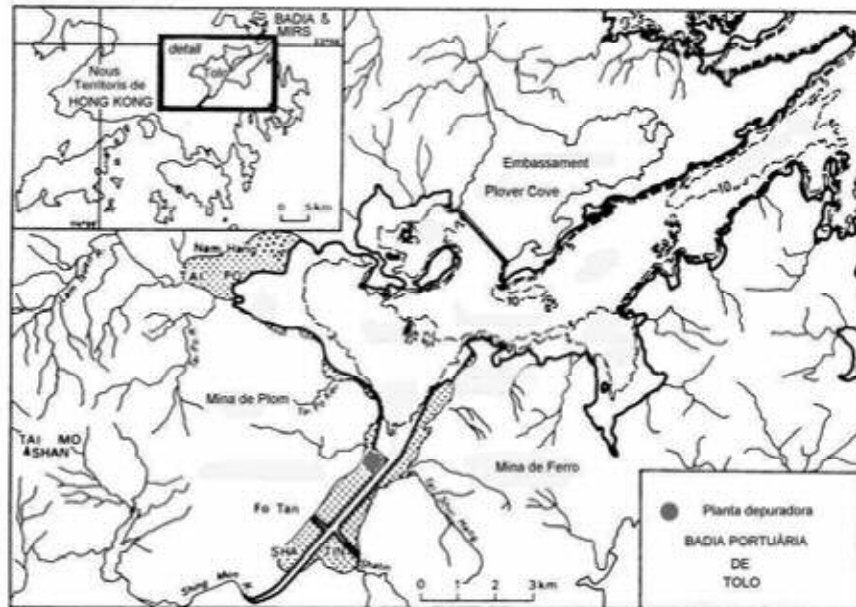


Figura B.9 Localització de la badia portuària de Tolo, Hong Kong, Xina (Hodgkiss i Yim 1995).

Badia d'Uranouchi (Japó)

Està situada a la part més al sud de l'arxipèlag japonès, a la vessant sud de l'Illa de Shikoku (Figura B.10), com una badia petita, estreta i allargada (9km x 0.5km x 16m, aproximadament) amb contorn irregular, i connectada per un ressalt estret i somer amb l'Oceà Pacífic a través del Golf o Badia de Tosa (Ueda 1949, Fukami *et al.* 1996, Somsueb *et al.* 2001). Experimenta fortes precipitacions durant els mesos de juny, juliol i agost a causa dels monsons del Sud-Oest, mentre que els monsons del Nord-Est porten pluges suaus durant els mesos de setembre a desembre. La precipitació anual és de 3100 mm, i la temperatura aèria es troba entre els 25 °C a l'hivern i els 35 °C a l'estiu, mentre que l'aquàtica oscil·la entre 15 °C i 30 °C (Ohno 1988). El rang mareal de de l'ordre de 2 m (Y. Munekage, *com. pers.*). La badia d'Uranouchi sovint es troba estratificada, i a l'estiu el percentatge de saturació d'oxigen descendeix considerablement (Munekage 1992, Kimura i Izumi 1994), havent-se descrit en el passat valors de 15.7 % (Ueda 1949). Les espècies de bivalvs de vida llarga de la badia s'han extingit en el transcurs de 50 anys des de 1942, a causa possiblement de l'eutrofització associada a les granges de peixos (Iga i Kondo 1993).

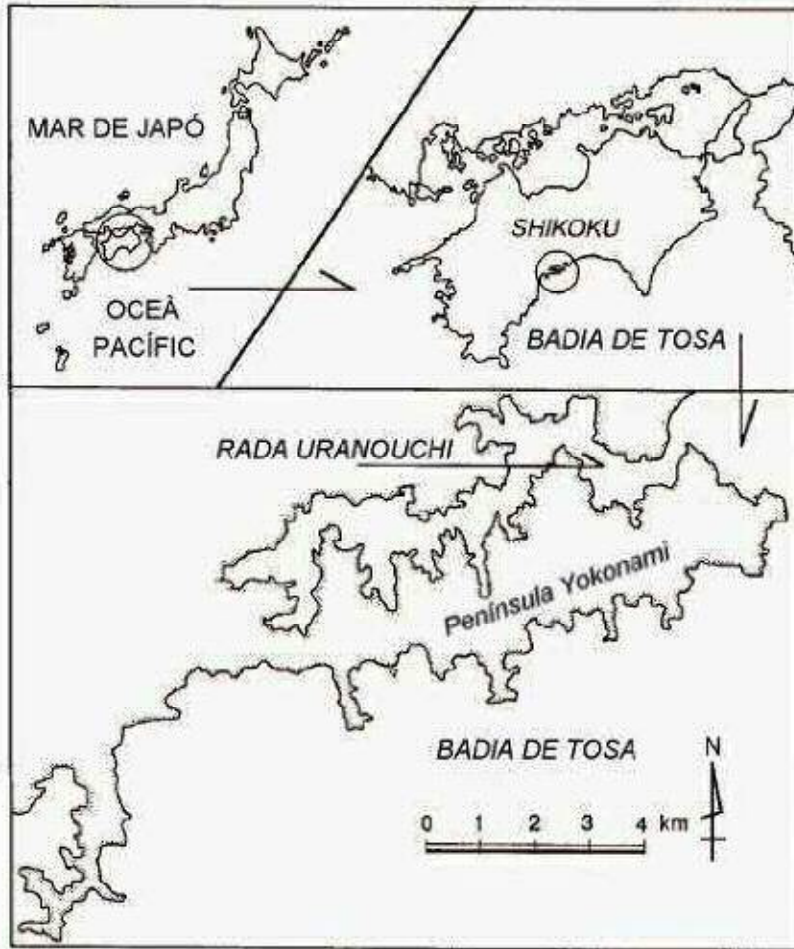


Figura B.10 Localització de la badia d'Uranouchi, Shikoku, Japó (a partir de Somsueb et al. 2001).

Bibliografia

- Alden III, R. W., 1997. Dynamics of an estuarine ecosystem - The Chesapeake Bay experience: statistical approaches and water quality patterns. *Oceanologica Acta*, 20 (1): 55-69.
- Allanson, B. R., 2001. Some factors governing the water quality of microtidal estuaries in South Africa. *Water SA Pretoria*, 27 (3): 373-386.
- Anderson, L. i Rydberg, L., 1988. Trends in nutrient and oxygen conditions within the Kattegat: effects of local nutrient supply. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 26 559-570.
- Bell, S., 1999. Gap Dynamics in a Seagrass Landscape. *Ecosystems*, 2 (6): 493-504.
- Branch, G. M. i Day, J. A., 1984. Ecology of southern African estuaries: Part 13. The Palmiet River Estuary in the south-western Cape. *S. Afr. J. Zool.*, 19 (2): 63-77.
- Chau, K. W. i Jin, H., 1998. Eutrophication model for a coastal bay in Hong Kong. *Journal of Environmental Engineering*, 124 (7): 628-638.
- Chau, K. W. i Sin, Y. S., 1992. "Correlation of water quality parameters in Tolo Harbour, Hong Kong", a *Water Quality International '92 Washington Dc, 1992.*, 2555-2558.
- Fukami, K., *et al.*, 1996. Distribution of heterotrophic nanoflagellates and their importance as the bacterial consumer in a eutrophic coastal seawater. *Journal of Oceanography*, 52 399-407.
- Gibbs, M. T., *et al.*, 2000. Maintenance of Near-Surface Stratification in Doubtful Sound, a New Zealand Fjord. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 51 (6): 683-704.
- Harcourt Baldwin, J. L., 2000. "Circulation and residence of water in small Mediterranean-climate estuaries", a *10th Southern African Marine Science Symposium SAMSS 2000: Land, Sea and People in the New Millennium Abstracts*, 1. University of Port Elizabeth, Port Elizabeth, South Africa.
- Harding, L. W., Jr., 1994. Long-term trends in the distribution of phytoplankton in Chesapeake Bay: Roles of light, nutrients and streamflow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 104 (3): 267-291.
- Hearn, C. J., 1998. Application of the Stommel model to shallow mediterranean estuaries and their characterization. *Journal of Geophysical Research C Oceans*, 103 (C5): 10,391-10,404.
- Hearn, C. J. i Largier, J. L., 1997. The summer buoyancy dynamics of a shallow Mediterranean estuary and some effects of changing bathymetry: Tomales Bay, California. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45 (4): 497-506.
- Hearn, C. J. i Lukatelich, R. J., 1990. "Dynamics of Peel-Harvey Estuary, southwest Australia", a *Physics of Shallow Estuaries and Bays*, 431-450. Springer-Verlag, New York.
- Hearn, C. J. i Robson, B. J., 2001. Inter-annual variability of bottom hypoxia in shallow mediterranean estuaries. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 52 (5): 643-657.
- Hodgkin, E. P. i Clark, R., 1988. Wilson, Irwin and Parry Inlets: The Estuaries of Denmark Shire., 3:
- Hodgkiss, I. J. i Yim, W. W. S., 1995. "A case study of Tolo Harbour, Hong Kong", a *Eutrophic Shallow Estuaries and Lagoons.*, 41-57.
- Iga, H. i Kondo, Y., 1993. Environmental changes of Uranouchi Bay, Kochi, during about 50 years (1943-1992), as inferred from bivalve distribution. *Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi Univ. Kochidai Kaiyoseibutsu Kenpo*, 13 11-19.

- Jacobson, P., 1983. Physical Oceanography of the Trondheimsfjord. *Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics*, 26 3-26.
- Jørgensen, B. B. i Richardson, K., 1996. Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. *Coastal and Estuarine Studies*, 52: 273.
- Kimura, H. i Izumi, M., 1994. Effect of oxygen deficiency of the sea bottom of bay. *Fish. Eng. Japan Suisan Kogaku*, 31 (1): 41-45.
- Kuo, A. Y. i Neilson, B. J., 1987. Hypoxia and salinity in Virginia estuaries. *Estuaries*, 10 (4): 277-283.
- Lam, C. W. Y. i Ho, K. C., 1989. "Red tides in Tolo Harbour, Hong Kong", a *Red Tides: Biology, Environmental Science, and Toxicology. Proceedings of the First International Symposium on Red Tides Held November 10 14, 1987, in Takamatsu, Kagawa Prefecture, Japan.*, 49-52.
- Largier, J. L., 1986. Structure and mixing in the Palmiet Estuary, South Africa. *S. Afr. J. Mar. Sci. S. Afr. Tydskr. Seewet.*, 4 139-152.
- Largier, J. L., *et al.*, 1996. "Density structures in 'low inflow' estuaries", a *Buoyancy effects in Coastal and Estuarine Dynamics*, 53, 227-241. AGU, Washington, D.C.
- Largier, J. L., *et al.*, 1997. Seasonally hypersaline estuaries in Mediterranean-climate regions. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 45 (6): 789-797.
- Largier, J. L. i Taljaard, S., 1991. The dynamics of tidal intrusion, retention, and removal of seawater in a bar-built estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 33 (4): 325-338.
- Leth, O. K., 1995. "A study on the effect of local wind on the dynamics of the upper layer in the inner part of Malangen", a *Ecology of Fjords and Coastal Waters: Proceedings of the mare Nor Symposium on the Ecology of Fjords and Coastal Waters, Tromsø, Norway, 5 9 December, 1994*, 185-194.
- Lewis, R. R. I., *et al.*, 1998. The rehabilitation of the Tampa Bay Estuary, Florida, USA as an example of successful integrated coastal management. *Proceedings of an International Workshop on the Rehabilitation of Degraded Coastal Systems*, 20: 129-130.
- Li, C. Y., *et al.*, 1998. Separating baroclinic flow from tidally induced flow in estuaries. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 103 (C5): 10405-10417.
- Lusseau, D., *et al.*, 2003. The bottlenose dolphin community of Doubtful Sound features a large proportion of long-lasting associations. Can geographic isolation explain this unique trait? *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 54 (4): 396 - 405.
- Morrison, G., *et al.*, 1997. Estimated Nitrogen Fluxes and Nitrogen-Chlorophyll Relationships in Tampa Bay, 1985-1994. *Proceedings of the Tampa Bay Area Scientific Information Symposium*, 3:
- Munekage, Y., 1992. Application of a two-layer box model to dissolved oxygen budget in Uranouchi Bay. *Coast. Eng. Japan*, 35 (1): 129-145.
- Ohno, M., 1988. Seasonal changes of the growth of green algae, *Ulva* sp. in Tosa Bay, Southern Japan. *Marine Fouling*, 7 (1/2): 13-17.
- Öztürk, M., *et al.*, 2002. Iron Speciation in the Trondheim Fjord from the Perspective of Iron Limitation for Phytoplankton. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 5 (2): 197-212.
- Ranasinghe, R. i Pattiaratchi, C., 1998. Flushing characteristics of a seasonally-open tidal inlet: A numerical study. *Journal of Coastal Research*, 14 (4): 1405-1421.
- Rosenberg, R., 1985. Eutrophication - the future marine coastal nuisance? *Marine Pollution Bulletin*, 16 227-231.

- Rydberg, L., *et al.*, 1990. Interaction between supply of nutrients, primary production, sedimentation and oxygen consumption in SE Kattegat. *Ambio*, 19 134-141.
- Sakshaug, E. i Myklestad, S., 1973. Studies on the phytoplankton ecology of the Trondheimsfjord. III. Dynamics of phytoplankton Blooms in relation to environmental factors, bioassay experiments and parameters for the physiological state of the populations. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 11 (157-188):
- Smith, S. V. i Hollibaugh, J. T., 1997. Annual cycle and interannual variability of ecosystem metabolism in a temperate climate embayment. *Ecological Monographs*, 67 (4): 509-533.
- Somsueb, S., *et al.*, 2001. Development of seaweed communities on suspended substrata with three slope angles. *Journal of Applied Phycology*, 13 (2): 109-115.
- Stanton, B. R. i Pickard, G. L., 1981. Physical oceanography of the New Zealand fiords:
- Taljaard, S., *et al.*, 1986. The Palmiet Estuary: A model for water circulation using salinity and temperature measurements over a tidal cycle. *Water S.A.*, 12 (3): 119-126.
- Ueda, M., 1949. Hydrological observation on the Uranouchi Bay Kochi Prefecture, Japan. *Bull Jap Soc Sci Fish*, 15 (4): 190-198.
- Wang, P. F., *et al.*, 1999. Water Quality and Eutrophication in Tampa Bay, Florida. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 49 (1): 1-20.
- Wu, R. S. S., 1982. Periodic defaunation and recovery in a subtropical epibenthic community, in relation to organic pollution. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 64 (3): 253-270.

Annex C. Augmenten les hipòxies?

Annex C. Augmenten les hipòxies?

Existeix una certa creença de què els progressius efectes de la pujada de la temperatura a nivell global del planeta podrien portar associats una major freqüència i extensió dels fenòmens hipòxics en sistemes marins costaners (Kennedy 1990, Beukema 1992). Per altra banda s'ha descrit una tendència d'increment d'eutrofització costanera al llarg i ample del món (Walsh *et al.* 1981, Nixon *et al.* 1986), i els seus símptomes locals han estat repetidament anomenats com la possible causa de davallades d'oxigen constatades arreu (Turner i Rabalais 1944, Jørgensen 1980, Officer *et al.* 1984, Rosenberg 1985, Anderson i Rydberg 1988, Rosenberg 1985, Colombo *et al.* 1992, Vollenweider *et al.* 1992, Justic *et al.* 1993, Orel *et al.* 1993). De fet, el que sí que s'ha constatat són canvis extrems a gran escala temporal en la concentració d'oxigen de sistemes marins (constatació feta a partir de Savrda i Bottjer 1991 i altres estudis en Tyson i Pearson 1991 que van analitzar registres paleoambientals per tal de reconstruir conques marines antigues). Un altre exemple concret ben documentat és el de la plataforma continental de Louisiana, en què en comparar els senyals estratigràfics de foraminífers bentònics en testimonis de sediment datats amb ^{210}Pb , per tal de llegir l'empremta històrica de la hipòxia en els últims dos-cents anys, van trobar evidència d'un increment general de déficit d'oxigen (en intensitat i durada), especialment en els últims 100 anys Sen-Gupta *et al.* 1996.

A finals del segle XX s'ha descrit una zona de mínims d'oxigen en algunes àrees de l'oceà, generalment a fondàries intermèdies de la columna d'aigua, típicament en oceans oberts o al llarg de línies de costa. En algunes àrees de mar profund aquesta zona pot arribar fins al fons, exposant la fauna a concentracions baixes d'oxigen dissolt (Thomson *et al.* 1985, Wishner *et al.* 1990, Levin *et al.* 1991). Els registres sedimentaris citats anteriorment suggereixen que les grans extensions de l'oceà on es donen aquestes concentracions mínimes d'oxigen persistents a prop del fons, potser no són només conseqüència d'un fenomen de les últimes dècades, sinó que existiren ja des de més antic.

Des d'un altre òptica totalment diferent, es pot observar que s'ha publicat força articles sobre les hipòxies en sistemes marins somers en les últimes dècades (Figura C.1), si bé aquesta tendència està molt possiblement esbiaixada per la dificultat d'accedir a les cites similars de dècades anteriors als anys 70 a través de les bases de dades electròniques actuals. A més, la preocupació per les hipòxies esdevé més important a mesura que augmenta la pressió demogràfica sobre la costa, i aquesta ha augmentat de manera molt important arreu del món. És a dir, la creença que les hipòxies poden haver augmentat amb el temps no es veu confirmada per aquest estudi bibliomètric. Es va realitzar ja amb anterioritat una compilació exhaustiva d'informes d'hipòxies a escala mundial pel National Oceanographic Data Center, a Washington (EUA). Van recollir més de 2 milions d'observacions de concentracions d'oxigen dissolt entre 1905 i 1982 per a mars, oceans i àrees estuarianes (salinitat < 28 psu), de les quals 27.413 manifestaven condicions hipòxiques (catalogades com a tals, segons el seu criteri emprat, amb concentracions per sota de 0.2 ml O₂ l⁻¹). El fet

remarcable dels seus resultats (Kamykowski i Zentara 1990) que voldria destacar aquí, és que tampoc no van trobar una tendència d'increment monòtona al llarg de tot el segle sinó que la moda de la seva distribució es troba cap als anys 60, i no al final del seu registre d'observació (Figura C.2).

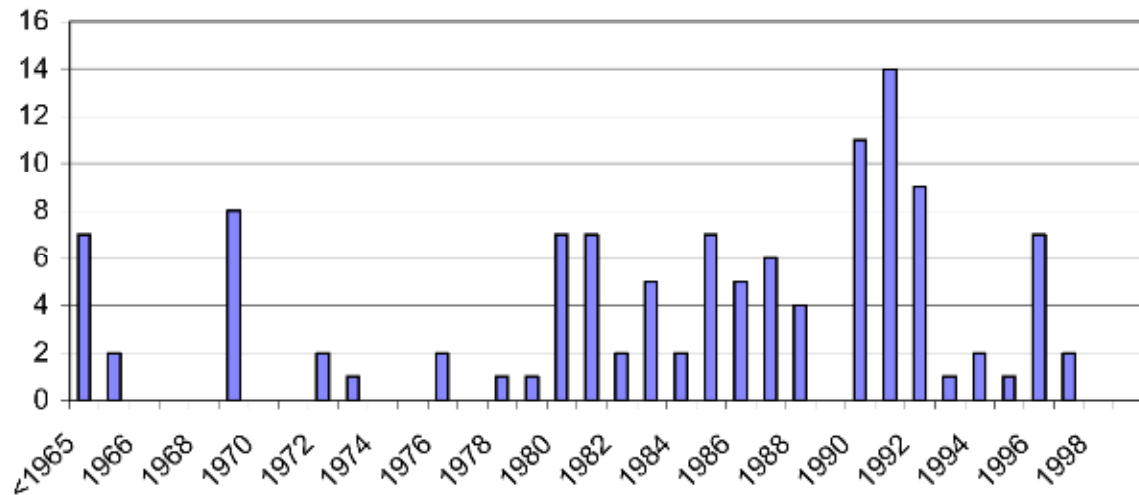


Figura C.1. Articles amb citacions d'episodis anòxics o hipòxics en ambients estuarins costaners

La creença de que pot haver augmentat amb el temps la durada i extensió dels fenòmens hipòxics en sistemes estuarins en el segle XX sembla haver-se creat, de fet, sense que existeixin sèries de dades prou llargues (de varies dècades) que la sostinguin adequadament. Únicament en alguns ecosistemes com els de la badia de Chesapeake existeixen estudis prou antics (Newcombe i Horne 1938) com per a poder suggerir amb legitimitat, a hores d'ara, tendències al llarg del segle al seu cos central (Officer *et al.* 1984) i als seus subestuaris (Heinle *et al.* 1980). Però ni en aquest cas s'ha pogut demostrar que existeixi aquesta tendència a incrementar les hipòxies a llarg termini: s'han fet estudis estadístics de tendències del fitoplàncton a partir d'extenses sèries de dades recollides des de 1950 (Harding 1994, Harding i Perry 1997), però els estudis publicats fins a la data que han buscat tendències similars per a l'oxigen dissolt tan sols es remunten a 1984 (Alden III 1997). Les seves conclusions si que indiquen que existeixen tendències significatives a disminuir l'oxigen de la capa de fons, un cop extret l'efecte distorsionador del flux variable del riu sobre la sèrie d'oxigen dissolt. Però aquests estudis estadístics es limiten a poc més que una dècada d'observació. És a dir, no hi ha hagut estudis que analitzin estadísticament sèries temporals prou extenses d'oxigen dissolt de sistemes estuarins fins a la data, de la mateixa manera que s'ha fet per a la temperatura de l'aigua, per exemple, com s'ha comentat en el Capítol 1 d'aquesta tesi.

Un conjunt de cites que es podrien fer servir per sostenir la hipòtesi de l'increment de les hipòxies procedeixen d'estudis de finals del segle XX per a l'àrea de l'Skagerrak (Suècia; plana 319). En la primera, Rosenberg (Rosenberg 1985) afirma que efectivament (es cita textualment) "alguns fiords

suecs semi-tancats a l'Skagerrak han estat afectats per (...) i, sembla, per increments espacials i temporals de desoxigenació de la seva aigua fonda (Lindahl i Hernroth 1983)". Després de llegir la seva font de documentació per suggerir aquesta hipòtesi, i analitzar les seves conclusions des d'una perspectiva més àmplia, seria erroni extrapolar la seva mateixa conclusió en un rang temporal o espacial més ampli, a manca de més dades que ho sostinguessin. La tendència de l'oxigen dissolt descrita és certa, però no la seva transcendència, segons la reduïda sèrie temporal de dades a partir de la qual es fonamenta. Lindhal i Hernroth van estudiar tan sols la sèrie de 1978 a 1981 (inclosos) en el fiord Gullmar, que es un exemple típic de fiord "tricapa" de 120 m de fondària màxima i permanentment estratificat. El ressalt es troba als 40 m, i tota l'aigua a major fondària presenta fenòmens de tendència a disminuir la concentració d'oxigen durant el seu període d'observació, coincidint amb unes concentracions extraordinàriament altes de Clorofil·la a la capa eufòtica (0-12m), dins la capa d'aigua estuària més superficial. De totes formes, són freqüents en els fiords escandinaus els períodes plurianuals recurrents en que l'aigua fonda del sistema tricapa roman estancada durant diversos anys. Aquesta situació finalitza quan, de sobte, en un any concret canvien les condicions hidrodinàmiques oceàniques properes, i "empenyen" una massa d'aigua salada nova que sobrepassa el ressalt d'entrada al fiord i es renova la capa d'aigua més fonda, fins el proper període d'intercanvi. Així doncs, aquesta cita d'increment temporal i espacial de les hipòxies en la que es fonamenta R. Rosenberg s'ha de reconsiderar únicament en l'àrea dels fiords escandinaus i per a escales de temps curtes (de pocs anys). Caldria que s'acompanyés l'"extrapolació" amb una longitud temporal de dades superior a la freqüència de renovació periòdica de l'aigua fonda d'aquell fiord, que bé podria ser major que quatre anys com passa en altres fiords (Dahl i Danielssen 1992).

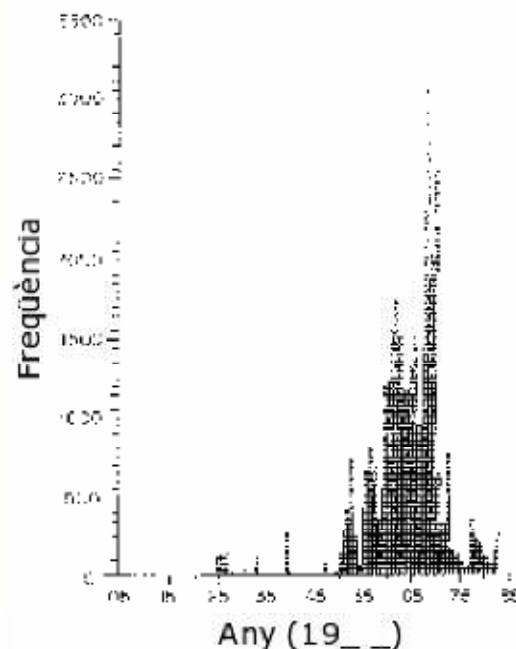


Figura C.2. Diagrama de freqüències amb el nombre d'observacions cada any, per a totes les observacions descrites a Kamykowski i Zentara (1990).

La segona cita de l'Skagerrak és més recent (Johannessen i Dahl 1996). Han analitzat un extens conjunt de dades de concentració d'oxigen dissolt entre 1927 fins a mitjans dels anys 90 i a partir dels seus resultats afirmen que "la disminució de les saturacions d'oxigen a la capa intermèdia i a l'aigua del fons és un fenomen àmpliament estès al llarg de la costa noruega". De totes formes les conclusions d'aquest treball han estat discutides per altres autors al·legant diversos errors estadístics (Gray i Abdullah 1996), pel que la disminució d'oxigen que hi descriuen no és un fet unànimement acceptat.

Hi ha una última referència que també reforça la hipòtesi de que no han existit diferències significatives de decrement de l'oxigen dissolt a l'Skagerrak. Anderson i Rydberg (1988) no van trobar cap tendència a l'oxigen dissolt en analitzar mostres mensuals entre Agost i Octubre durant els anys compresos entre 1965 i 1982 (mentre que a l'aigua fonda del Kattegat, aquest decrement sí que va ser estadísticament significatiu).

Molt a prop de l'Skagerrak, a la badia de Kiel (Alemanya) Weigelt (1991) va descriure que els successos d'esgotament d'oxigen estaven augmentant la freqüència, severitat i extensió espacial. Ho afirma citant hipòxies en 10 dels 24 anys entre 1961 i 1985 (a partir de mesures hidrogràfiques, bentòniques i/o de pesqueries) malgrat no s'observa cap tendència clara en la seva sèrie de dades. El que sí que han mesurat amb més detall espacial i continuïtat han estat les biomasses d'organismes bentònics al llarg de prop de 20 anys. A partir de l'increment d'abundàncies d'organismes amb tolerància al dèficit d'oxigen i el decrement dels menys tolerants, dedueixen que va augmentar la freqüència d'aparició de les hipòxies. De totes formes, Weigelt fonamenta el seu argument citant especialment un treball seu de l'any anterior (Weigelt 1990). En aquest altre treball, la sèrie de dades hidrogràfiques de més de 30 anys (entre 1953 i 1986) va ser presa en el lloc més allunyat de la circulació general entre el Kattegat i el Bàltic, que a més té una forma comparable, en certa manera, a la d'un fiord escandinau estret i allargat, amb el que es redueix encara més l'eventual renovació d'aigua fonda general de la zona propera. És a dir, essent estrictes, no és un clar exemple de les condicions generals de la propera al Mar de Belt, i les conclusions que es poden treure del seu anàlisi en aquest indret tan singular només poden tenir una aplicació de caire local. En resum, es pot indicar que els períodes hipòxics en la zona de la Badia de Kiel efectivament estarien augmentant "aparentment", però no seria lícit afirmar-ho de forma categòrica a partir de les seves dades per a tota la zona de connexió entre el Bàltic i el Mar del Nord.

Val a dir que cal ser cautelosos amb les afirmacions sobre la dinàmica de l'oxigen en les aigües del Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i badia Kiel (en general tota la zona de connexió entre el Mar del Nord i el Mar Bàltic) a partir de sèries de dades de poques dècades d'extensió, com ja s'ha comentat anteriorment. Per exemple, malgrat va haver una tendència de disminució de les concentracions d'oxigen a la part més fonda de la conca de l'Skagerrak (700m) fins a 1988, aquesta va anar seguida per un influx d'aigua rica en oxigen per sobre del rebaix a 270m el 1990. Després d'aquesta renovació

de l'aigua fonda no van quedar evidències de que els valors d'oxigen de principis dels 90 fos inferior al dels anys 50 ó 60 (Dahl i Danielssen 1992).

Un altre de les cites que relata un deteriorament ambiental durant 50 anys recents, ho fa a partir de distribució d'organismes bentònics en la badia d'Uranouchi Inlet, Shikoku, Japó (Iga i Kondo 1993). Es nodreix de la comparació del nombre d'espècies de bivalvs, i dels seus individus de forma puntual, a partir de 22 mostres de 1943 i 1992, en que s'observa un decrement de 10 a 6 espècies, i un augment de les poblacions d'individus petits, de vida curta i adaptats a la pol·lució orgànica. Relacionen aquest canvi directament a la presència de masses d'aigua deficitàries d'oxigen a la part central de la badia. Aquestes hipòxies estan agreujades per les granges d'aqüicultura instal·lades, que juntament amb la circulació estuariana disminuïda a causa de l'orografia que l'aïlla de la badia de Tosa i de l'Oceà Pacífic, són les màximes responsables d'aquest empitjorament. En aquest cas tampoc no hi ha un estudi estadístic significatiu al llarg de varies dècades que ho corrobori, pel que hem de tornar a la mateixa conclusió que en casos anteriors: sembla que els episodis deficitaris d'oxigen podrien estar augmentant, però no es disposa de prou dades per a afirmar-ho categòricament.

En el nostre cas d'estudi, es coneix que la badia dels Alfacs ha patit en el passat alguns episodis de mortalitats sobtades de peixos segons els pescadors de la zona (com. pers.), normalment atribuïts a la presència d'algues nocives o bé a fenòmens anòxics. Ambdós fenòmens han estat posteriorment descrits a la badia, tant el cas de la proliferació de dinoflagelats productors de substàncies iclotòxiques (Garcés *et al.* 1999) com l'esgotament local d'oxigen, descrit per primer cop a l'any 1990 per Camp (1994). A partir del seguiment setmanal de la qualitat de l'aigua fet per tècnics del Centre Nacional d'Aqüicultura a partir de 1990, es va poder observar com l'any 1992 es van registrar valors de concentració d'oxigen per sota dels 2 mg O₂ l⁻¹ al punt mig de la badia, inferiors fins i tot als enregistrats el 1990 i 1991 (Figura 2.8c). El 1994 s'assoliren valors encara més baixos, propers a 1 mg O₂ l⁻¹ en el mateix punt de mostreig, el que fa pensar que hi devia haver un episodi d'anòxia de gran magnitud i abast a la badia. Es desconeix, també en el cas d'Alfacs, si aquestes hipòxies són fruit de situacions atípiques recurrents amb freqüència baixa però constant al llarg del temps, o si, per altra banda, són fruit d'una tendència temporal a incrementar la seva aparició i durada.

La pregunta "Augmenten les hipòxies?" no es pot respondre tal qual. Cal definir millor l'àmbit espacial i temporal al qual es fa referència, com hem vist, i cal especificar si per buscar aquest esperat augment s'ha de tenir en compte tant la freqüència d'aparició dels fenòmens hipòxics com la seva durada i intensitat. De totes formes, la intuïció ens diu a alguns que en un gran nombre d'aquests casos si que deuen haver augmentat el nombre i/o la severitat dels dèficits d'oxigen al llarg d'aquest segle, o com a mínim en les últimes dècades; el rigor científic, però, ens obliga convertir la possible afirmació d'una "evidència" en tan sols una "possibilitat", pendent de demostració experimental. Dit en paraules de Diaz i Rosembeg (Diaz i Rosenberg 1995), tretes de la seva última i excel·lent revisió sobre hipòxia bentònica marina:

"Mentre han existit ambients hipòxics i anòxics al llarg dels temps geològics, la seva aparició en àrees costaneres someres i àrees estuàries sembla estar-se incrementant, més probablement accelerada per activitats humanes".

Més enllà d'aquesta afirmació a nivell general no es pot anar. Per tant, el millor és deixar aquesta pregunta, fins que hi hagi més dades per respondre-la amb propietat a través del mètode científic.

Bibliografia

- Alden III, R. W., 1997. Dynamics of an estuarine ecosystem - The Chesapeake Bay experience: statistical approaches and water quality patterns. *Oceanologica Acta*, 20 (1): 55-69.
- Anderson, L. i Rydberg, L., 1988. Trends in nutrient and oxygen conditions within the Kattegat: effects of local nutrient supply. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, 26 559-570.
- Beukema, J. J., 1992. Expected changes in the Wadden Sea benthos in a warmer world: Lessons from periods with mild winters. *Proceedings of the 26th European Marine Biology Symposium. Biological Effects of Disturbances on Estuarine and Coastal Marine Environments*, 30: 73-79.
- Camp, J., 1994. Aproximaciones a la dinámica ecológica de una bahía estuárica mediterránea. Doctoral, 245 pp., Barcelona.
- Colombo, G., *et al.*, 1992. Marine eutrophication and population dynamics:
- Dahl, E. i Danielssen, D. S., 1992. Long-term observations of oxygen in the Skagerrak. *ICES Mar. Sci. Symp.*, 195 455-461.
- Diaz, R. J. i Rosenberg, R., 1995. Marine benthic hypoxia: A review of its ecological effects and the behavioural responses of benthic macrofauna. *Oceanography and Marine Biology - An Annual Review*, 33 245-303.
- Garcés, E., *et al.*, 1999. *In situ* growth rate and distribution of the ichthyotoxic dinoflagellate *Gyrodinium corsicum* Paulmier, in an estuarine embayment (Alfacs Bay, NW Mediterranean Sea). *Journal of Plankton Research*, 21 (1): 1977-1991.
- Gray, J. S. i Abdullah, M. I., 1996. Are there negative trends in oxygen saturation along the Norwegian Skagerrak coast? *Limnol. Oceanogr.*, 41 (4): 810-812.
- Harding, L. W., Jr., 1994. Long-term trends in the distribution of phytoplankton in Chesapeake Bay: Roles of light, nutrients and streamflow. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 104 (3): 267-291.
- Harding, L. W., Jr. i Perry, E. S., 1997. Long-term increase of phytoplankton biomass in Chesapeake Bay, 1950-1994. *Marine Ecology Progress Series*, 157 39-52.
- Heinle, D. R., *et al.*, 1980. Historical review of water quality and climatic data from Chesapeake Bay with emphasis on effects of enrichment:

- Iga, H. i Kondo, Y., 1993. Environmental changes of Uranouchi Bay, Kochi, during about 50 years (1943-1992), as inferred from bivalve distribution. *Bull. Mar. Sci. Fish. Kochi Univ. Kochidai Kaiyoseibutsu Kenpo*, 13 11-19.
- Johannessen, T. i Dahl, E., 1996. Negative trends in oxygen saturation along the Norwegian Skagerrak coast, 1927-1993: A signal of ecosystem changes due to eutrophication? *Limnol. Oceanogr.*, 41 766-778.
- Jørgensen, B. B., 1980. Seasonal oxygen depletion of in the bottom waters of a Danish fjord and its effects on the benthic community. *Oikos*, 34 68-76.
- Justic, D., *et al.*, 1993. Seasonal coupling between riverborne nutrients, net productivity and hypoxia. *Mar. Pollut. Bull.*, 26 (4): 184-189.
- Kamykowski, D. i Zentara, S. J., 1990. Hypoxia in the world ocean as recorded in the historical data set. *Deep Sea Res.*, 137 (1A): 1861-1874.
- Kennedy, V. S., 1990. Anticipated effects of climate change on estuarine and coastal fisheries. *Fisheries*, 15 (6): 16-25.
- Levin, L. A., *et al.*, 1991. Control of deep-sea benthic community structure by oxygen and organic matter gradients in the eastern Pacific Ocean. *Journal of Marine Research*, 49 763-800.
- Lindahl, O. i Hernroth, L., 1983. Phyto-zooplankton community in coastal waters of western Sweden- an ecosystem off balance? *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 10 (2): 119-126.
- Newcombe, C. L. i Horne, W. A., 1938. Oxygen poor waters in the Chesapeake bay. *Science*, 88 80-81.
- Nixon, S. W., *et al.*, 1986. Nutrients and the productivity of estuaries and coastal marine ecosystems. *J. Limnol. Soc. S. Afr.*, 12 (1/2): 43-71.
- Officer, C. B., *et al.*, 1984. Chesapeake Bay Anoxia: Origin, Development, and Significance. *Science*, 223 22-27.
- Orel, G., *et al.*, 1993. Ipossie e anossie di fondali marini L'Alto Adriatico e il Golfo di Trieste:
- Rosenberg, R., 1985. Eutrophication - the future marine coastal nuisance? *Marine Pollution Bulletin*, 16 227-231.

- Savrda, C. E. i Bottjer, D. J., 1991. "Oxygen-related biofacies in marine strata: an overview and update." a *Modern and ancient continental shelf anoxia*, Special Publication 58, 201-219. Geological Society, London.
- Sen-Gupta, B. K., *et al.*, 1996. Seasonal oxygen depletion in continental-shelf waters of Louisiana: Historical record of benthic foraminifers. *Geology*, 24 (3): 227-230.
- Thomson, J. B., *et al.*, 1985. Alternative biofacies model for disaerobic communities. *Lethaia*, 18 167-179.
- Turner, R. E. i Rabalais, N. N., 1944. Coastal eutrophication near the Mississippi river delta. *Nature*, 368 619-621.
- Tyson, R. V. i Pearson, T. H. e., 1991. Modern and ancient continental shelf anoxia, Special publication 58:
- Vollenweider, R. A., *et al.*, 1992. Marine Coastal Eutrophication:
- Walsh, J. J., *et al.*, 1981. Biological export of shelf carbon as a sink of the global CO₂ cycle. *Nature*, 291 196-201.
- Weigelt, M., 1990. Oxygen conditions in the deep water of Kiel Bay and the impact of inflowing salt-rich water from the Kattegat. *Meeresforsch*, 33 (1): 1-22.
- Weigelt, M., 1991. Short- and long-term changes in the benthic community of the deeper parts of Kiel Bay (Western Baltic) due to oxygen depletion and eutrophication. *Meeresforsch*, 33 197-224.
- Wishner, K., *et al.*, 1990. Involvement of the oxygen minimum in benthic zonation on a deep seamount. *Nature*, 346 57-9.

**Annex D. “OMMEL: Oxygen Model for
Microtidal Estuaries and Lagoons”**

Annex D. "OMMEL: Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons"

D.1. Introduction

OMMEL stands for "Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons". It is a multiplatform Fortran 90 based computer program which implements a 2 dimensional box model to calculate mass balances of dissolved oxygen in water. OMMEL requires, as input files, some data of forcing functions and ecological parameters related to

- benthic and planktonic communities,
- system topography and dimensions,
- meteorological data (light, wind speed, temperature), and
- hydrological data (salinity, temperature, initial conditions of dissolved oxygen).

After OMMEL runs the simulation, some output files are saved on disk, which can be later analyzed or visualized using common software packages. Some scripts are available to produce graphs and simple and common calculations based on "R" project software for statistical computing and scientific graphics (multiplatform, free software; <http://www.r-project.org>), or Matlab © (proprietary software).

The numerical model was initially designed for Alfacs Bay, Ebre Delta, NW Mediterranean, and called "ABOM" (Alfacs Bay Oxygen Model). In 2002 other research groups became interested in the model to apply it to other scenarios overseas, and thus, it was renamed to its present name and shared as free software under the terms of the General Public License of the GNU Project (<http://gnu.org>). See the legal notice below to learn how to use or modify this program for your own purpose.

OMMEL source code is written in Fortran 90 and can be compiled using the free software compiler GNU Fortran (<http://gcc.gnu.org/fortran>), so that binary versions of the program are available for various operating systems.

OMMEL files are available through Sourceforge.net (Figura D.1):

<http://sourceforge.net/projects/ommel>

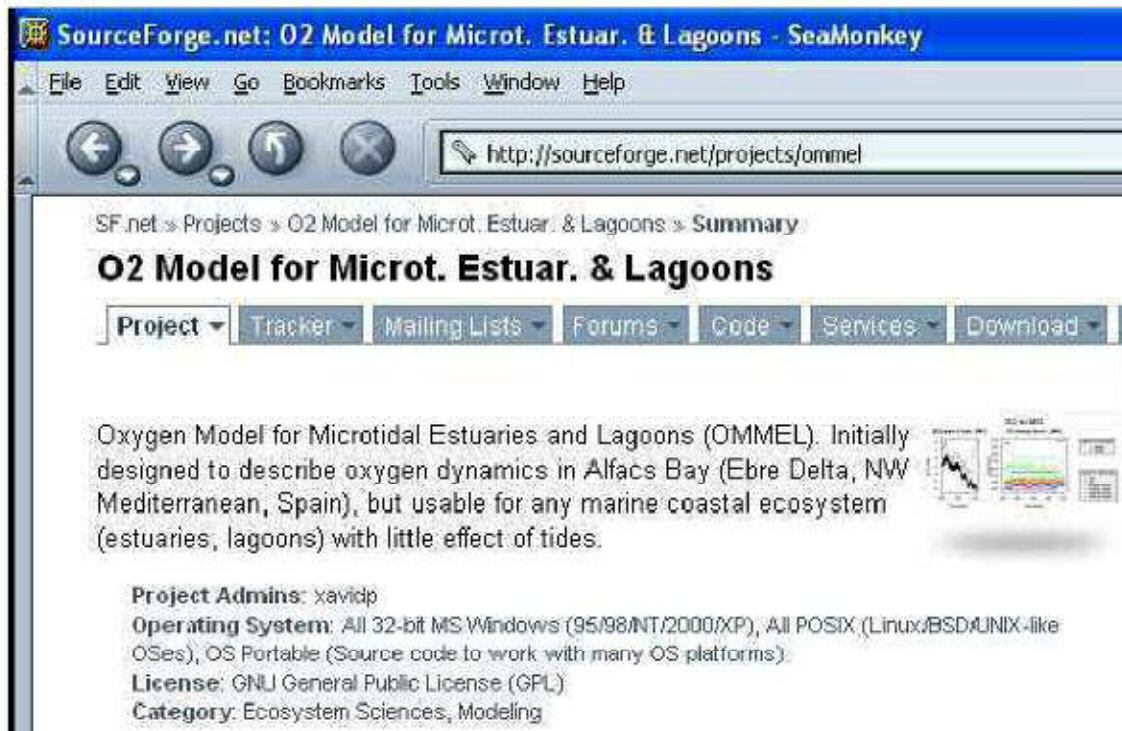


Figura D.1. OMMEL Home page at Sourceforge.net, the main portal to produce and find free software on the net. URL for OMMEL project: <http://sourceforge.net/projects/ommel>.

D.1.1. Overview

You can get OMMEL software from: <http://sf.net/projects/ommel>

Download it and unpack it to your working directory. If needed, you can get decompressing software from <http://www.7zip.org>. The executable file is under the directory `./bin`, so you need to change to that directory.

In order to run a simulation with OMMEL, execute the file `ommel` (under GNU/Linux), or `ommel.exe` (under MS Windows). This executable file will require fetching some input files, like the ones included in directory `./files_in` (with fake data, just as demo of the type and format of files needed). You need their content adapted to your own natural system. The better the input files, the better the simulation results, according to our experience. Ommel software comes with other folders containing other scripts and utilities (Figura D.2).

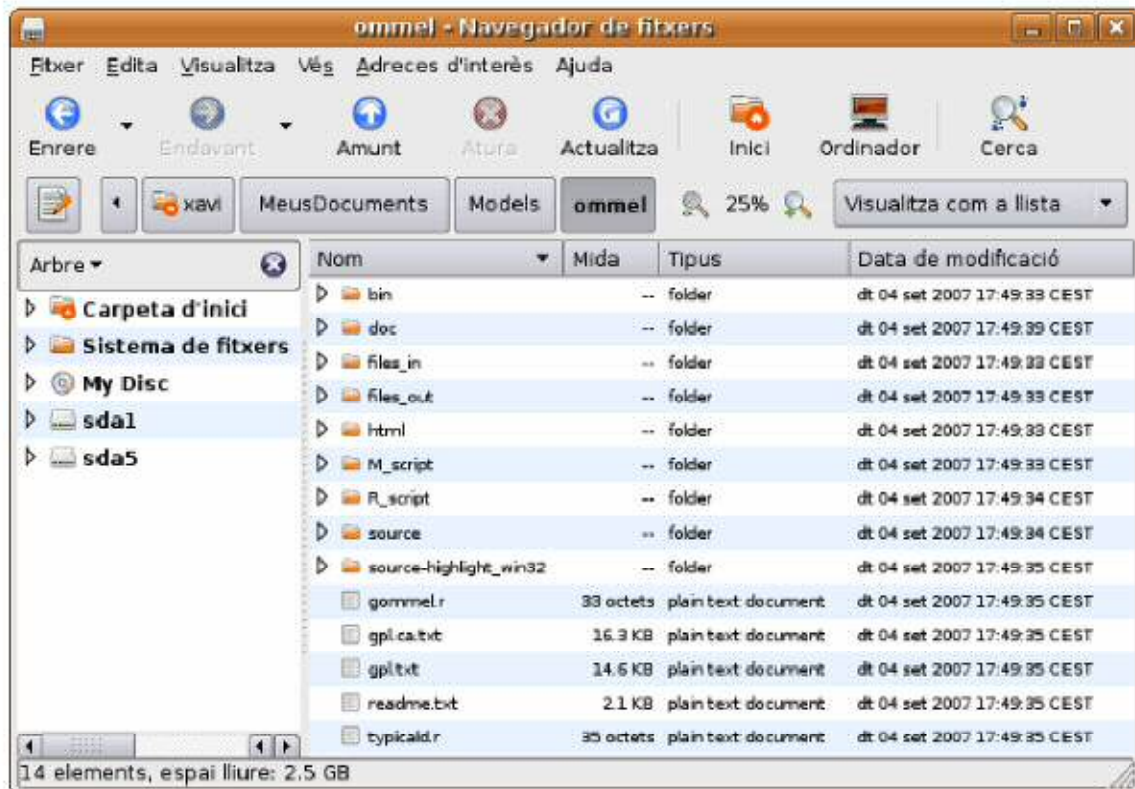


Figura D.2. OMMEL File tree, including the folders for binaries, input files, output files, R_scripts, Fortran source, and others. See text for more details.

Once you execute the program, you will see a screen like the ones shown in Figura D.3 and Figura D.4 (for GNU/Linux and MS Windows respectively), where you will be asked to:

- select the initial day of the year (in Julian days, i.e, numbered from 1 to 365).
Select "1", for instance.
- the final day of the simulation.
Select "365", for instance.
- select if you want to run a hydrostatic model; if no, then hydrodynamics will be considered according to a simple Officer (1984) box model.
Select "n", for instance, to have hydrodynamics into account.
- select if macroalgae self shading has to be considered, and which algorithm should be used to quantify it (in this ph. D. thesis algorithm 2 has been used in all calculations).
Select "2", for instance.

Then, you will end up with a screen like this:



Figura D.3. OMMEL dialog in a shell windows under GNU/Linux

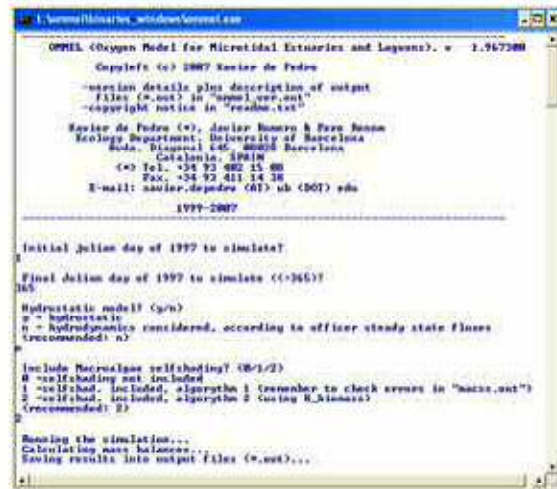
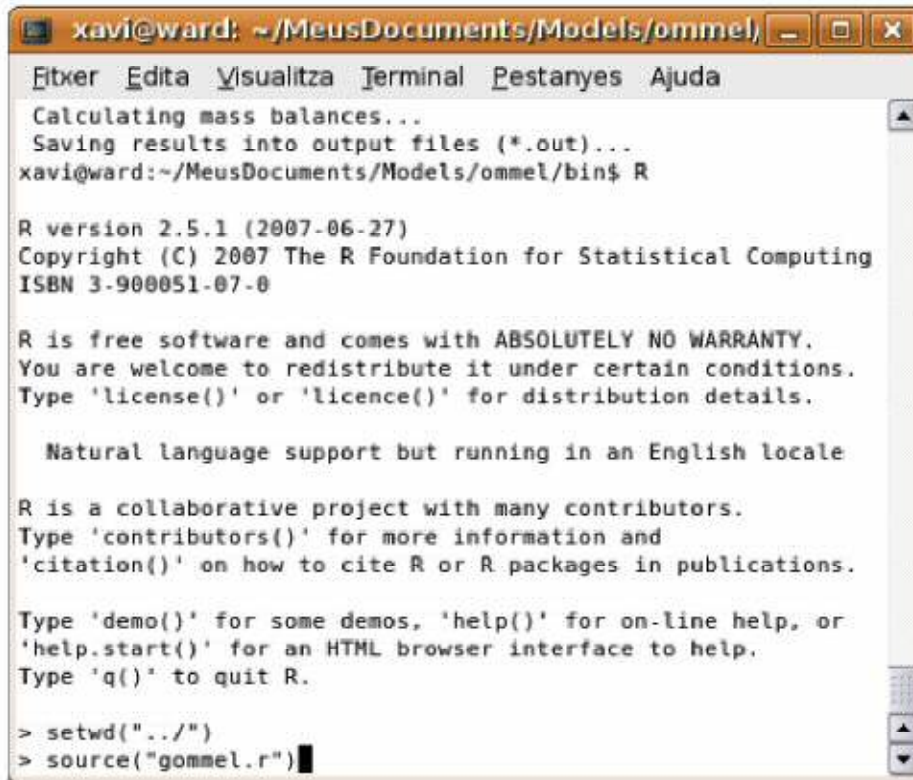


Figura D.4. OMMEL dialog in a shell windows under MS Windows

Once the simulation is finished, the results will be saved in the folder `./files_out` as ASCII files with `.out` extension. Data from different variables is saved inside each file (see below) as columns of fixed size from the second line onwards, having the codes from the variables included in the first line of that file. Then, you can import these data into your favorite Spreadsheet program, or make some exploratory plots with the provided scripts using "GNU R" software. R software is for statistical analyses and data visualization is free software available for GNU/Linux and MS Windows, downloadable from <http://www.r-project.org>.

Once you have it installed in your system, you run it by typing "R" at the command prompt from the same shell window where you executed OMMEL. For instance:



```

xavi@ward: ~/MeusDocuments/Models/ommel
Fitxer  Edita  Visualitza  Terminal  Pestanyes  Ajuda
Calculating mass balances...
Saving results into output files (*.out)...
xavi@ward:~/MeusDocuments/Models/ommel/bin$ R

R version 2.5.1 (2007-06-27)
Copyright (C) 2007 The R Foundation for Statistical Computing
ISBN 3-900051-07-0

R is free software and comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY.
You are welcome to redistribute it under certain conditions.
Type 'license()' or 'licence()' for distribution details.

Natural language support but running in an English locale

R is a collaborative project with many contributors.
Type 'contributors()' for more information and
'citation()' on how to cite R or R packages in publications.

Type 'demo()' for some demos, 'help()' for on-line help, or
'help.start()' for an HTML browser interface to help.
Type 'q()' to quit R.

> setwd("../")
> source("gommel.r")

```

Note that the prompt now switches, in this example (using GNU/Linux) from "[xavi@ward:~/.../bin\\$](#)" to ">", which shows the common prompt symbol when you are inside "R" workspace.

Then you need to set the working directory to the one level upwards, since you were at "`./ommel/bin`". You can do that with the command:

```
> setwd("../")
```

Then you are at "`./ommel`". There you can call the "`gommel.r`" script, which will draw several graphs from a basic output of OMMEL, or the "`typicald.r`" scripts, from means every hour of the day. You can run those scripts by typing the command:

```
> source("gommel.r")
```

or

```
> source("typicald.r")
```

This will produce many graphs on the screen, and if requested, also as image files on disk.

Further sections describe the input files needed (`*.in`), the output files generated (`*.out`), the Fortran source code of OMMEL, and the R scripts to produce the graphs shown below.

In order to edit those scripts to create your own graphs, you can use any good text editor, but there are some programs specifically deigned to work with R syntax and linked to R program. See below for more details in a the section "D.1.4. Editing the source code using free software".

D.1.2. Description of Input and Output files

The program needs some **input files** (*.in):

Input files needed by OMMEL

1. llum.in	Irradiance in $W\ m^{-2}$, every $\frac{1}{2}$ h
2. k.in	Light extinction coefficient, weekly, 3 boxes
3. param.in	Parameters and other things..., monthly
4. biom.in	Biomasses and other things..., monthly
5. ts.in	Temp.(C) & sal (psu) at each box, monthly
6. dboh.in	Biochemical oxygen demand, per hour
7. ws97h.in	(hourly values)
8. inflows.in	Freshwater flows (F_{alga} , F_{unc} , F_{agl} , F_{dep}) monthly, in $m^3\ s^{-1}$.

Sample content of these files is shown further down as examples.

And the program produces the following output files (*.out):

Columns in file **Light.out**

1. jtime	(24:nshours)
2. Rhour	(pyr GEMM in Alfacs, in $Watt\ m^{-2}$)
3. iazo	(espherical quantum sensor, AmpostaDARP, $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$)
4. iwzo	(espherical quantum sensor, below water, $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$)
5. iwz1	($z=-1.3m$ in $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$)
6. iwz2	($z=-4.3m$ in $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$)
7. iwz3	($z=-5.5m$ in $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$, on top of macroalgae mat)
8. ws	(Amposta, z^{-+10m} . in $m\ s^{-1}$)
9. imac_b	(just below the macroalgae mat in mig, in $microE\ m^{-2}\ s^{-1}$)

Columns in file **miHSAT.out**

1. jday	(2:nsdays)
2. HSAT	in miS for Phytoplankton (h)
3. HSAT	in miF for Phytoplankton (h)
4. HSAT	in miF for Caulerpa prolifera (h)
5. HSAT	in miF for Alsidium corallinum (h)
6. ws_d	daily mean, at any box surface ($m\ s^{-1}$)

Columns in file **xxDOh.out**

-
1. jtime (24:nshours)
 2. DO_ at xx box, lower (mg l⁻¹)
 3. DO_ at xx box, upper (mg l⁻¹)
 4. DOtpc at xx box, lower (%)
 5. DOtpc at xx box, upper (%)
 6. dDO_ at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 7. dDO_ at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
-

(The next columns exist only in R or MATLAB ** typicald ** script)

10. DO_max at xx box, any? (mg l⁻¹ for 100 %O2 saturation)
-

Columns in file **xxDOd.out**

-
1. jtime (24:nshours)
 2. DO_bm at xx box, lower, for sp 1: *C. prolifera* (mg l⁻¹ h⁻¹)
 3. DO_bm at xx box, lower, for sp 2: *A. corallinum*(mg l⁻¹ h⁻¹)
 4. DO_pm at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 5. DO_pm at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 6. BNPh_a at xx box, from *Caulerpa prolifera* (mg m⁻² h⁻¹)
 7. BNPh_a at xx box, from *Alsidium corallinum* (mg m⁻² h⁻¹)
 8. BRh_a at xx box, from *Caulerpa prolifera* (mg m⁻² h⁻¹)
 9. BRh_a at xx box, from *Alsidium corallinum* (mg m⁻² h⁻¹)
 10. DO_hyd at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 11. DO_hyd at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 12. DO_adv at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 13. DO_adv at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 14. DO_exc at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 15. DO_exc at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 16. DO_ae at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 17. DO_imp_h written at boDOd.out only, at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
 18. DO_imp_h written at boDOd.out only, at xx box, upper (mg l⁻¹ h⁻¹)
 - 19(17). BNPh_a at xx box, from microphytobenthos (mg m⁻² h⁻¹)
 - 20(18). BRh_a at xx box, from bare sediment (mg m⁻² h⁻¹)
-

(The next column exist only in R or MATLAB ** typicald ** script)

25. DO_sed at xx box, lower (mg l⁻¹ h⁻¹)
-

Columns in file **xxBPML.out**

1. jday (2:nsdays)
 2. PNPd at xx box, lower ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 3. PRd at xx box, lower ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 4. BNPd_v at xx box, lower, per vol., *C. prolifera* ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 5. BRd_v at xx box, lower, per vol., *C. prolifera* ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 6. BNPd_a at xx box, lower, per area, *C. prolifera* ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 7. BRd_a at xx box, lower, per area, *C. prolifera* ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 8. BNPd_v at xx box, lower, per vol., *A. corallinum* ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 9. BRd_v at xx box, lower, per vol., *A. corallinum* ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 10. BNPd_a at xx box, lower, per area, *A. corallinum* ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 11. BRd_a at xx box, lower, per area, *A. corallinum* ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 12. BNPd_a at xx box, sediment, per area ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
 13. BRd_a at xx box, sediment, per area ($\text{mg m}^{-2} \text{d}^{-1}$)
-

Columns in file **xxPMU.out**

1. jday (2:nsdays)
 2. PNPd at xx box, upper ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 3. PRd at xx box, upper ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 4. DO_ae_d at xx box, upper ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 5. DO_hyd_d at xx box, LOWER! ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 6. DO_hyd_d at xx box, upper! ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 - (7).DO_imp_d FOR BOCA ONLY! boPMU.out, lower ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
 - (8).DO_imp_d FOR BOCA ONLY! boPMU.out, upper ($\text{mg l}^{-1} \text{d}^{-1}$)
-

Columns in file **flows.out** (acording to *Figura 1.4a* of this thesis)

1. month
2. F01 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
3. F12 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
4. F23 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
5. F34 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
6. F45 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
7. F56 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
8. F67 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
9. F16 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
10. F25 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
11. E16 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
12. E25 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
13. E34 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

Columns in file xxDOC.out

1. jtime (24:nshours)
 2. DOC at xx box, lower (ppm)
 3. DOC at xx box, upper (ppm)
 4. DOChyd at xx box, lower (ppm h⁻¹)
 5. DOChyd at xx box, upper (ppm h⁻¹)
-

Columns in file xxSALIN.out

1. jtime (24:nshours)
 2. S at xx box, lower (g l⁻¹)
 3. S at xx box, upper (g l⁻¹)
 4. Shyd at xx box, lower (g l⁻¹ h⁻¹)
 5. Shyd at xx box, upper (g l⁻¹ h⁻¹)
-

Columns in file rsed.out

1. month
 2. rsed_a hourly value, per area (mgO₂ m⁻² h⁻¹)
 3. rsed_v hourly value, per vol. (mgO₂ l⁻¹ h⁻¹), box 1
 4. rsed_v hourly value, per vol. (mgO₂ l⁻¹ h⁻¹), box 2
 5. rsed_v hourly value, per vol. (mgO₂ l⁻¹ h⁻¹), box 3
 6. mphbGP hourly value, per area (mgO₂ m⁻² h⁻¹)
-

Columns in file o2balanc.out

(explained inside file)

Columns in file gprIndex.out

(GP:R, also equivalent to internal variable em_index)

1. jday (2:nsdays)
 2. gpr in Boca , for benthos (unitless)
 3. gpr in Mig , for benthos (unitless)
 4. gpr in Kua , for benthos (unitless)
 5. gpr in ALFACS, for benthos (unitless)
 6. gpr in Boca , for plankton (unitless)
 7. gpr in Mig , for plankton (unitless)
 8. gpr in Kua , for plankton (unitless)
 9. gpr in ALFACS, for plankton (unitless)
 10. gpr in Boca , for bent&plank (unitless)
 11. gpr in Mig , for bent&plank (unitless)
 12. gpr in Kua , for bent&plank (unitless)
 13. gpr in ALFACS, for bent&plank (unitless)
-

Columns in file **topo.out**

1. box number
 2. vol Volume of box (m^3)
 3. sedsur Surface of box in contact with sediment (m^2)
 4. airsurr Surface of box in contactwith air (m^2)
 5. z_ini Initial depth of box (m)
 6. z_end Final depth of box (m)
-

Columns in file **maess.out**

1. jtime (24:nshours)
 2. Fss at bo box, lower, for sp 1: *C. prolifera* (%)
 3. Fss at bo box, lower, for sp 2: *A. corallinum* (%)
 4. Fss at mi box, lower, for sp 1: *C. prolifera* (%)
 5. Fss at mi box, lower, for sp 2: *A. corallinum* (%)
 6. Fss at ku box, lower, for sp 1: *C. prolifera* (%)
 7. Fss at ku box, lower, for sp 2: *A. corallinum* (%)
 8. MNPDss at bo box, lower, for sp 1: *C. prolifera* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
 9. MNPDss at bo box, lower, for sp 2: *A. corallinum* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
 10. MNPDss at mi box, lower, for sp 1: *C. prolifera* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
 11. MNPDss at mi box, lower, for sp 2: *A. corallinum* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
 12. MNPDss at ku box, lower, for sp 1: *C. prolifera* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
 13. MNPDss at ku box, lower, for sp 2: *A. corallinum* ($mg\ l^{-1}\ h^{-1}$)
-

Columns in file **runerror.out** (for selfshading algorith 1)

1. err from 1 to 3 (explanation inside file)
 2. jday
 3. shour
 4. box
 5. sp
 6. iwz4
 7. biom
 8. Fss_
-

Columns in file **iwz_surfer.out**

1. jday (2:nsdays)
 2. depth (depth, from 0 to -6m)
 3. iwz (in microE $m^{-2}\ s^{-1}$)
-

Columns in file **reflexio.out**

-
1. jday (2:nscdays)
 2. hour (1 to 24)
 3. shour (1 to nshours)
 4. Rhour ($W m^{-2}$)
 5. ref (%)
 6. ref_srough(% , included surface roughness of wind shear)
 7. ws ($m s^{-1}$)

D.1.3. Basic description of the main program (for newbies)Prog. main

- Declaration of variables
- ABOM presentation in screen
- Ask user for dates of simulation
- Ask user to include hydrodyn.
- Ask user for macroalgae selfshading algorithm
- Assign memory for dinamic variables
- Open input files
- Open output files
- Parameter inicialization and boundary conditions(from inside code)
- Set n. of spp-code groups to 5 (2 macroalgae, 1 sed., 1 phytop., 1 DBO5)

Temporal loop(hours). do shour=12,nshours

- Update time counters

Spatial loop. do nbox=1,6

BIOLOGICAL PROCESSES

- Lower Box? (nbox=1,3)

Lower layer (nbox=1,3)

- Call light_extinction()
- Call Benthos()
- Save hourly values (calculated in subroutine) into daily var., in prog. main (dummy loop nbox=1,3)
- Call Plankton()
- Save hourly values...

Upper layer (nbox=4,6)

- Call plankton()
- Save hourly values...

PHYSICAL PROCESSES

- Wind_aeration()
- Difussion

STATE VAR. TEMPORAL UPDATE

- Update state var. for non-conservative processes (biological & chemical...).

Go back to (or end) spatial loop

- hydrostatic?
- if NO:
- Call Advect()
- Call Echange()
- Save changes from dummy var. into DOhyd
- Update state vars. due to hydrod.
- Check for formation of bubbles

Go back to (or end) temporal loop (shour)

- Save results in files
- Close files
- Deallocate dynamic memmory

SUBROUTINES

- officer(), light_extinction(), plankton(), benthos(), advect(), exchange()

End_of_program_main

D.1.4. Editing the source code using free software

There are some good documentation out there to learn how to take profit from Fortran programming (Sun Microsystems 1995), even in some new sources in Catalan (Paniagua Valle and Solè Sabaté 2007).

And there are also some good free software tools for the daily work with Fortran Programming.

First, the *compiler*: either GFortran (<http://gcc.gnu.org/fortran>, the one used to produced the binaries in this Ph.D. thesis), or G95 (<http://www.g95.org>), which is kind of another variant of the same software, and both are the Fortran compilers from the GNU mother project (<http://gnu.org>). If you are an advanced Fortran user, you would be interested to know that there are possibilities to create Graphical User Interfaces (GUI) to your Fortran programs when using external tools like JAPI (<http://www.japi.de/>, Java based, described in Fortran Company 2005), or pilib (<http://pilib.beta-centauri.de>); however, this is task for only advanced users, and

not needed at all for basic programs to run under a shell and produce the output files with results (like OMMEL does by the time of this writing).

Second, there are many a good text editor, or even better, an Integrated Desktop Environment (IDE) to ease the task of editing source code files, with search (or even search and replace) capabilities in several files for the same text string, even if not all of them are ready to be coupled with programming in Fortran. Photran is a free software java based IDE for programming in almost whatever language, based on Eclipse IDE (<http://www.eclipse.org/photran/>). However, this is way too much difficult as the place to start with, and if you are starting as a programmer, then a simple and fast multiplatform text editor recognizing Fortran syntax like Geany (<http://geany.uvena.de/>) or a more advanced IDE like Code::Blocks (<http://www.codeblocks.org>) would do. These three examples are available free software under the GNU/Linux and MS Windows operating systems.

Moreover, once your program has produced your calculations and mass balances, and written results to output files, you might like to use specialized software for statistical analyses and visualization of data. There are many good alternatives out there (again, free software, and multiplatform), like R-project for statistical computing ("R", <http://www.r-project.org>), Octave (<http://www.octave.org>), SciLab (<http://www.scilab.org>), Numerical Python (<http://numpy.scipy.org>), Gnuplot (<http://www.gnuplot.info>), and there is also some documentation to help you translate your code among them and also from *Matlab* (Bronken Gundersen 2006), which is the alternative closed source and expensive program to do similar tasks. Among those free software tools, we have chosen R-project to make some scripts which automate the production of graphs and basic statistics upon OMMEL results and other ecological modeling software like FEMME (Soetaert *et al.* 2002), since the gallery of statistics and graphs produced by R and contributed by users around the globe is enormous (<http://addictedtor.free.fr/graphiques/>), and new extensions are apparently easily created (<http://cran.r-project.org/doc/vignettes/femmeR/femmeR.pdf>). R-project is a command line program (see screenshots above calling R after an OMMEL run is executed), very well documented for any user starting with good guides oriented to novice users on R environment, commands and graphs (Correa and González 2002, González *et al.* 2000, Paradis and Ahumada 2003, Venables *et al.* 2000). Moreover, R is having some good software companions to bring Graphical User Interfaces to ease the task for the new user to interact with R, being improved year after year, and thus, reducing the need to learn too many new command line instructions at a time. Among those GUI's that interact nicely with R we recommend RKward (<http://rkwad.sourceforge.net>), under GNU/Linux (Figura D.5), and SciViews (<http://www.sciviews.org>), under MS Windows (Figura D.6), which comes with Tinn-R editor inside (<http://www.sciviews.org/Tinn-R/>).

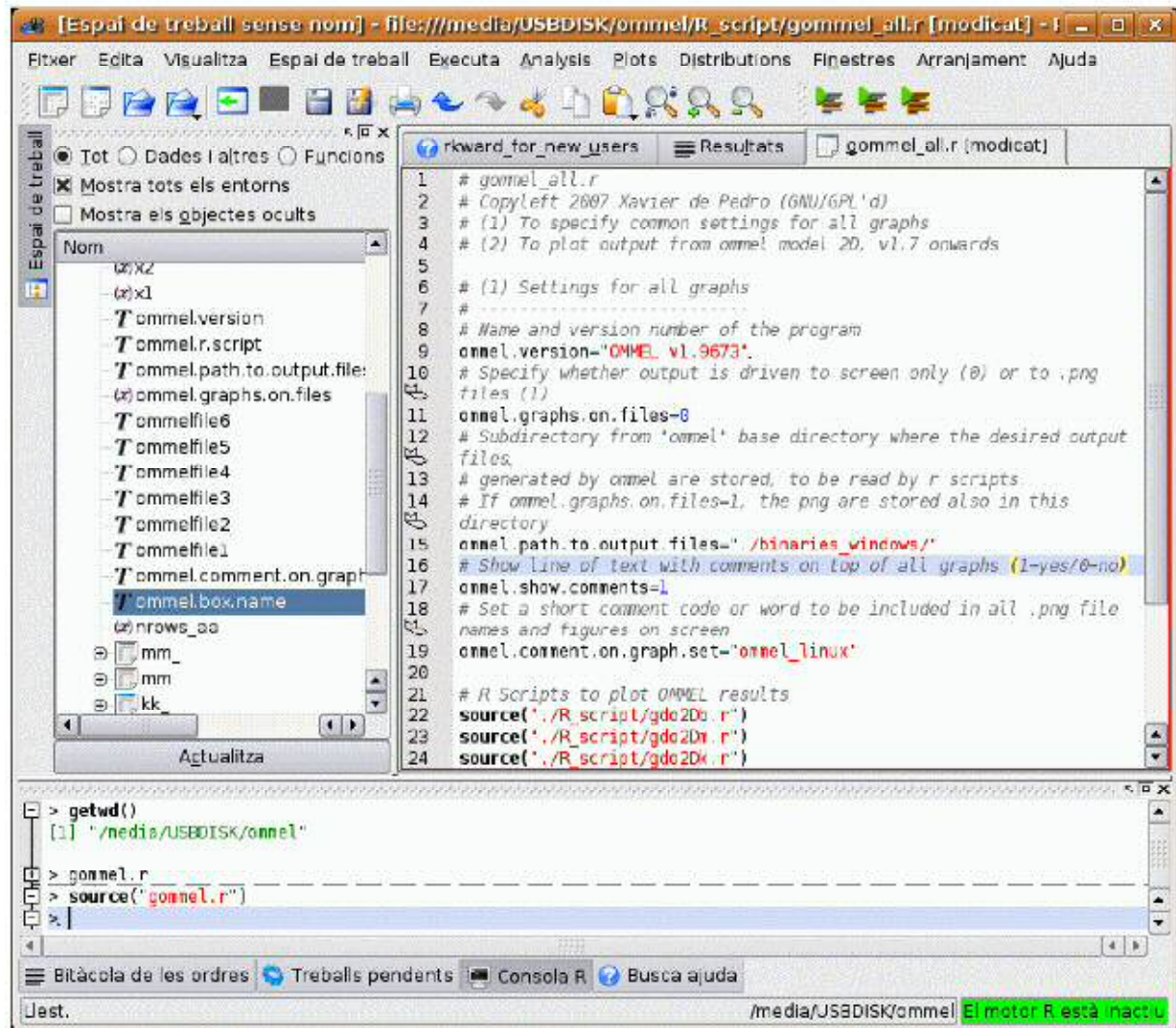


Figura D.5. Editing "R" scripts to produce graphs upon OMMEL results, using RKWard under GNU/Linux.

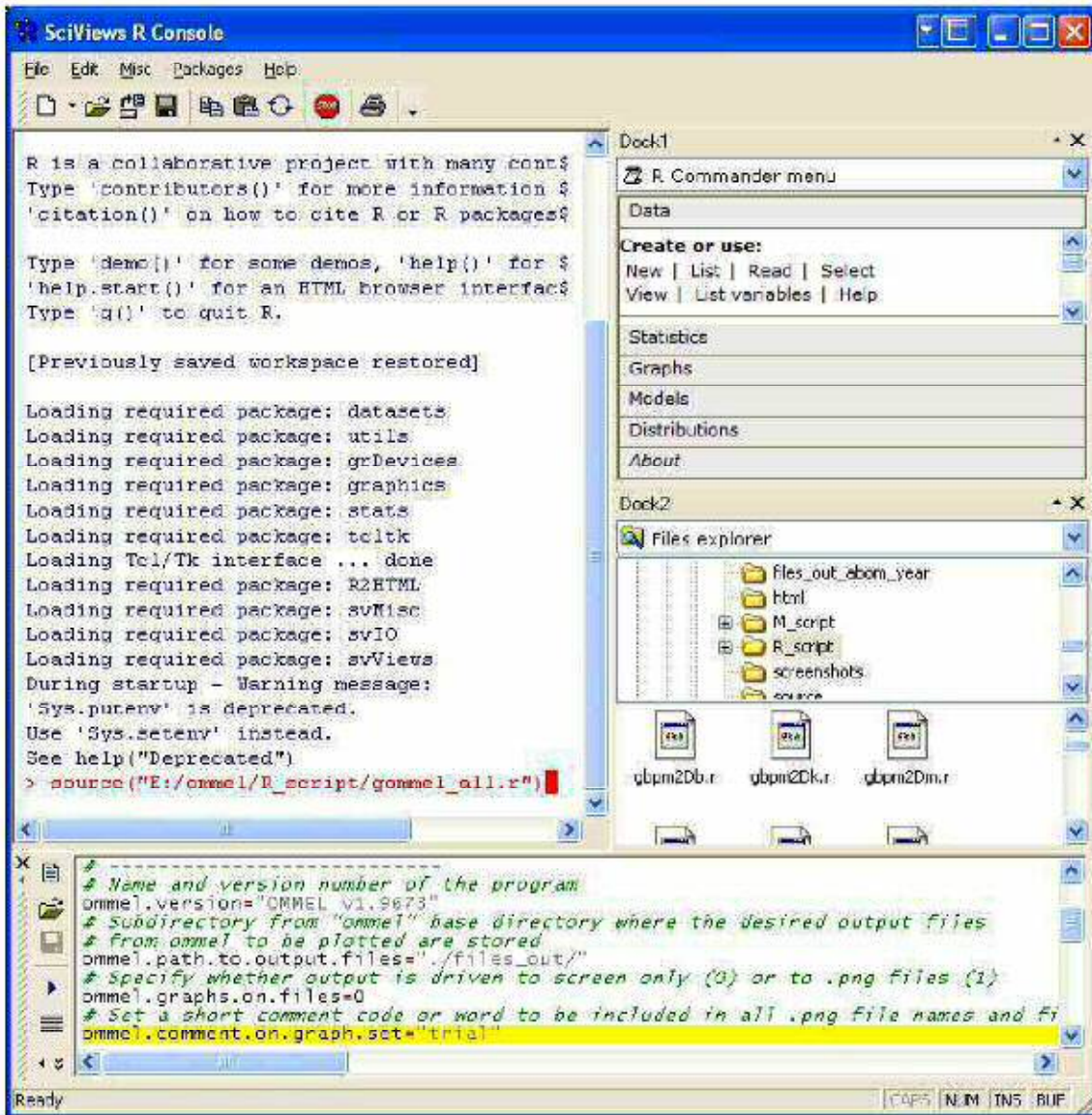


Figura D.6. Editing "R" scripts to produce graphs upon OMMEL results, using SciViews and Tinn-R under MS Windows.

D.1.5. Compiling the source code using free software

In order to compile OMMEL source code, you can execute the following commands one by one, or through the provided *ommel_compile.bat* script (the same file works either from GNU/Linux or MS Windows, at least if using GNU/Gfortran as compiler, and probably using any other Fortran 90 compiler). See specific comments inside this file, which explain the compiling options needed in order to compile successfully.

```
# ommel_compile.bat
# Script to compile OMMEL: Oxygen Model for Microtidal Estuaries and Lagoons
# Xavier de Pedro - Ecology Department - University of Barcelona
# http://sf.net/projects/ommel
#
# Thanks to Albert Solé for his help to produce this file including
# the tips for the non-common compilation options.
#-----
# Comments:
# 1.- The first file to be compiled is ommel_glb.f90, so that ommel_glb.mod is
#     generated, where global variables are defined
# 2.- The file ommel_out.f90 needs the compiler option
#     -ffree-line-length-none ; otherwise only the first 132 characters of each
#     line are taken into account
# 3.- Option -c indicates at compilation time the the corresponding
#     object file (.o) is generated
# 4.- Option -o indicates that the linking of object files is performed
#     in order to generate the executable
# 5.- In order to call this file that makes compilation and linking you only
#     need to start a shell under a GNU/Linux or similar system (or command
#     console under a MS Windows environment), change directory to where the .f90
#     files and this file are stored, write this file name and press intro.
#     (if this file is not executed, try doing: chmod a+x compile_file_name
#     and if it still resists itself to execute, try writing ./compile_file_name )
# 6.- In order to run the executable file produced (ommel), you only need to write
#     its name and press intro (or if it says it can't find it, write ./ommel )
#-----
# These two files are deleted if they exist; GNU/Linux
rm -f ommel
rm -f ommel_glb.mod

# Equivalent in some proprietary software
del ommel.exe
del ommel_glb.mod

# Object files are deleted; GNU/Linux
rm -f *.o
```



```
# Equivalent in some proprietary software
del *.o

# Individual compilations
gfortran -c ommel_glb.f90
gfortran -c ommel_bnt.f90
gfortran -c ommel_cal.f90
gfortran -c ommel_hyd.f90
gfortran -c ommel_ini.f90
gfortran -c -ffree-line-length-305 ommel_out.f90
gfortran -c ommel_plk.f90
gfortran -c ommel_ule.f90
gfortran -c ommel_ver.f90
gfortran -c ommel_wae.f90
gfortran -c ommel.f90
gfortran -c gemm_utils.f90
# Producing the executable file
gfortran -o ommel *.o
```

When finished compiling, you will have the binary file under `./source` directory. You can execute it from there, or move it to the `./bin` directory.

D.1.6. Showing the code as html with "Fortran" or "R" mark up.

If you ever plan to show your source code through something like a web page or printed in paper, you would like it to be somehow colorized, as it is colorized in most programming editors or IDE's). In this case, you can use a free software tool called *source-highlight* (<http://www.gnu.org/software/src-highlite/source-highlight.html>). It is included with OMMEL for the MS Windows, since it might not be easy for the novice user to find and install it, and both share the same GNU/GPL license.

The commands to execute this program are written in the script "*ommel_beautify_html.bat*", provided inside OMMEL *./source* directory. Again, the same file works either from GNU/Linux or MS Windows, provided you have the *source-highlight* installed within OMMEL, in case of Windows, or from your GNU/Linux software repositories, through "*apt-get install source-highlight*", (for Debian – Ubuntu, ... based), "*yum install source-highlight*" (for Fedora core based), or similar, depending on your GNU/Linux distribution). Since "R" markup is not yet included in *source-highlight* software, we'll use *python* markup instead, which will do the job instead as if it was an "R" high-lighter:

```
# Calls to source-highlight on a GNU/Linux environment
source-highlight --input=ommel.f90 --output=../html/ommel.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_bnt.f90 --output=../html/ommel_bnt.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_cal.f90 --output=../html/ommel_cal.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_glb.f90 --output=../html/ommel_glb.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_hyd.f90 --output=../html/ommel_hyd.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_ini.f90 --output=../html/ommel_ini.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_out.f90 --output=../html/ommel_out.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_plk.f90 --output=../html/ommel_plk.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_ule.f90 --output=../html/ommel_ule.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_ver.f90 --output=../html/ommel_ver.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=ommel_wae.f90 --output=../html/ommel_wae.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=gemm_utils.f90 --output=../html/gemm_utils.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n

# Calls to source-highlight on a win32 environment (the folder below must contain a copy of source-highlight.exe,
# and of all files originally under "c:/Program Files/GnuWin32/share/source-highlight")
cd "../source-highlight_win32"
source-highlight --input=../source/ommel.f90 --output=../html/ommel.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_bnt.f90 --output=../html/ommel_bnt.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_cal.f90 --output=../html/ommel_cal.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_glb.f90 --output=../html/ommel_glb.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_hyd.f90 --output=../html/ommel_hyd.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_ini.f90 --output=../html/ommel_ini.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_out.f90 --output=../html/ommel_out.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_plk.f90 --output=../html/ommel_plk.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_ule.f90 --output=../html/ommel_ule.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_ver.f90 --output=../html/ommel_ver.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/ommel_wae.f90 --output=../html/ommel_wae.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
source-highlight --input=../source/gemm_utils.f90 --output=../html/gemm_utils.html --src-lang=fortran --out-format=html -v -d -n
cd "../source"
```

D.2. Source code

OMMEL source code comprises several files (alphabetically sorted):

Name	Description
gemm_utils.f90	some functions used in several Fortran programs of the GEMM research group
ommel_bnt.f90	routines related to benthos processes
ommel_cal.f90	routines related to calculations for mass balances
ommel.f90	main program
ommel_glb.f90	global variables definition
ommel_hyd.f90	routines related to hydrodynamics
ommel_ini.f90	routines related to initialization of variables
ommel_out.f90	routines related to writing output results to files
ommel_plk.f90	routines related to plankton processes
ommel_ule.f90	routines related to underwater light extinction
ommel_ver.f90	routines related to describing software version
ommel_wae.f90	routines related to wind aeration

We will list the files below, including its content, sorted in a way more related to the sequence in which they are used in the program.

1. **ommel.f90: The program first calls the instructions written in main program**
2. **ommel_glb.f90: It needs the definition of the global variables**
3. **ommel_ver.f90: It writes a file with details about the software version**
4. **ommel_ini.f90: It initializes variables**
5. **ommel_ule.f90: It takes into account underwater light extinction**
6. **gemm_utils.f90: It requires some common functions in a special file**
7. **ommel_bnt.f90: It takes into account benthos processes**
8. **ommel_plk.f90: It takes into account plankton processes**
9. **ommel_wae.f90: It takes into account wind aeration processes**
10. **ommel_hyd.f90: It takes into account hydrodynamics**
11. **ommel_cal.f90 : It makes calculations for the mass balances**
12. **ommel_out.f90 : It saves results in output files**

Note:

There is folder in OMMEL project files called "sources", which contains the files with the Fortran source code, plus another folder called "html", which contains a colored version of the files viewable with a web browser and also showing the line numbers, in case the reader doesn't have any good source code editor available when reviewing OMMEL source code. Line numbers (with three digits + colon + space; e.g., "001: ") have been inserted at the beginning of each line of the code of these html files to ease potential referring of any line (thanks to "Source-highlight", another nice multiplatform tool from the GNU project: <http://www.gnu.org/software/src-highlite/source-highlight.html>).

Digital version of source code doesn't have these prefix characters at the beginning of each line (see <http://sf.net/projects/ommel>).

D.3. Sample input files

D.3.1. light.in

Irradiance in $W m^{-2}$, every $\frac{1}{2}$ h. Rows are days from 1 to 365. Shown only the first and last 3 rows of the file.

16	16	16	16	16	16	17	16	17	16	17	17	17
	17	17	16	14	6	6	51	90	92	226	282	282
	286	245	291	275	197	151	137	79	19	7	15	16
	17	17	17	16	16	16	16	17	16	16	16	
16	16	16	16	16	17	16	17	16	16	17	17	16
	16	16	16	16	14	11	8	5	5	19	44	42
	172	304	290	270	241	202	157	106	34	6	15	17
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
17	16	16	16	17	16	16	16	16	17	17	17	17
	17	17	16	16	11	6	24	58	150	269	197	307
	313	310	298	276	266	209	162	119	45	8	14	16
	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	
<i>(...row 4 to 362...)</i>												
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	17	14	18	20	92	166	209	244	264	268
	283	190	302	257	228	135	138	41	10	4	15	16
	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17	17	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	16	16	12	7	32	44	89	110	86	93
	60	118	90	67	18	12	12	5	5	10	15	16
	16	16	16	17	16	16	17	17	17	17	17	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
	17	17	17	15	10	10	12	6	12	23	40	85
	102	148	58	38	24	30	40	28	12	8	15	15
	15	16	16	16	16	17	17	17	17	16	17	

D.3.4. biom.in

Biomasses and other things..., monthly. This is fake input data, just to illustrate type and format of data needed.

Columns 1 to 6 refer to macroalgae biomass from *Caulerpa prolifera* and *Alsidium corallinum* in the three compartments (g DW m⁻²).

Columns 7 and 8 refer to [Chl a] from Phytoplankton in general, as it is used in OMMEL (mg Chl a m⁻³), for the deep layer (ChlaF) and for the surface layer (ChlaS).

Rows are for months from January (1) to December (12).

10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
10.0	10.0	0.00	0.00	10.0	10.0	5.00	5.00
cauh	cauc	cauk	alsh	also	alsk	ChlaF	ChlaS

D.3.5. ts.in

Temperature (C) & salinity (psu) at each box, monthly, in two pairs of data sets.

!-----!

1st data set corresponds to average values for each layer and month .

Water temperature in °C. 12 rows, one for each month: from January (1) to December (12) .

Columns correspond to stations:

boF miF kuF kuS miS boS .

Salinity in psu. 12 rows, one for each month: from January (1) to December (12) . Columns correspond to stations:

sal(0) sal(1) sal(2) sal(3) sal(4) sal(5) sal(6)

!-----!

2nd data set (only three columns) corresponds to values in surface water each month

Water temperature in °C. 12 rows, one for each month: from January (1) to December (12) .

Columns correspond to stations:

srfBoca srfMig srfKua

Salinity in psu. 12 rows, one for each month: from January (1) to December (12)

Columns correspond to stations:

srfBoca srfMig srfKua

12.20	11.90	11.50	11.30	11.20	11.10
13.42	13.48	13.32	13.45	13.30	13.15
14.63	15.05	15.13	15.60	15.40	15.20
16.47	16.78	17.27	17.50	17.20	17.17
19.07	19.27	19.91	20.89	20.94	20.89
21.67	21.75	22.55	24.27	24.67	24.60
23.40	23.43	23.60	24.07	24.10	23.60
23.99	24.12	24.55	24.65	24.10	23.97
24.57	24.80	25.50	25.23	24.10	24.33
24.50	23.90	24.80	25.00	24.60	24.70
20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
16.00	16.00	16.00	16.00	16.00	16.00
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.7	37.2	36.6	35.6	34.4	34.9
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
37.8	37.5	37.1	36.2	34.9	34.2
10.0	10.0	10.0			
13.3	13.0	13.3			
15.0	15.3	15.5			
17.5	17.8	19.2			
21.1	21.4	22.2			
24.8	25.0	25.2			
23.8	24.1	24.3			
23.2	23.4	23.5			
22.6	22.7	22.7			
23.6	23.0	23.6			
17.8	17.6	17.7			
13.0	13.0	13.0			
34.6	34.3	34.0			
34.2	33.6	32.9			
35.1	34.7	34.6			
35.2	34.7	34.5			
35.0	34.5	34.6			
34.7	34.3	34.7			
35.1	33.9	33.4			
35.1	34.1	33.1			
35.0	34.3	32.8			


```

36.0 34.3 34.9
35.9 35.7 35.4
35.0 35.0 35.0

```

D.3.6. dboh.in

Biochemical oxygen demand, per hour. DBOh(mg O₂ l⁻¹ h⁻¹). This is fake input data, just to illustrate type and format of data needed.

12 rows, one for each month: from January (1) to December (12)

```

-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500
-0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500 -0.01500

```

boF miF kaF kaS miS boS

D.3.7. ws97h.in

Wind speed (m s⁻¹), hourly values for the whole year (8760 rows). Shown only the first and last 3 rows of the file.

```

2.6
2.4
2.2
(...skipped from row 4 to 8757...)
1.9
1.4
1.3

```

D.3.8. inflows.in

Freshwater flows (F_{dgl}, F_{enc}, F_{ala}, F_{dep}) monthly, in m³ s⁻¹, arriving to the bay through boxes "Boca", "Mig", "Kua", "Dep" (Waste treatment plant), respectively . The same order is used below to sort columns.

12 rows, one for each month: from January (1) to December (12)

```

1.16 1.16 1.16 0.02315
1.16 1.16 1.16 0.02315
1.16 1.16 1.16 0.02315

```

1.16	1.16	1.16	0.02315
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
4.00	2.00	4.00	0.11574
1.16	1.16	1.16	0.02315
1.16	1.16	1.16	0.02315

D.4. Sample output files

D.4.1. o2masbal.out

OMMEL vers.	hydrostatic?	jday_ini	jday_end	ndays	selfshade?	
1.9672	n	64	67	4	2	

TOPOGRAPHY						

	Boca	Hig	Kua	SUM	ALFACS	
SED_SUR(m2)	0.12100E+08	0.91000E+07	0.10800E+08	0.32000E+08		
AIR_SUR(m2)	0.15000E+08	0.13000E+08	0.16000E+08	0.44000E+08		
VOL_low(m3)	0.32100E+08	0.27000E+08	0.25000E+08	0.84100E+08		
VOL_upp(m3)	0.36000E+08	0.26000E+08	0.33000E+08	0.97000E+08		
VOL_SUM(m3)	0.68100E+08	0.55000E+08	0.58000E+08	0.18110E+09		

MASS BALANCE						

(in a year)						
ECOS METAB.	Boca	Hig	Kua	ALFACS BAY	lower	upper
	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2
NET GAINS	0.91119E+13	0.68991E+13	0.85782E+13	0.24589E+14	0.15730E+14	0.88591E+13
LOSSES	-0.14442E+14	-0.11385E+14	-0.12349E+14	-0.38176E+14	-0.25467E+14	-0.12709E+14
GROSS GAINS	0.23554E+14	0.18294E+14	0.20927E+14	0.62765E+14	0.41197E+14	0.21568E+14

PROCESS	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2	mgO2
plankton_np	0.16740E+14	0.13339E+14	0.16032E+14	0.46109E+14	0.14451E+14	0.31658E+14
cau_np	0.15835E+12	0.11696E+12	0.00000E+00	0.27531E+12		
als_np	0.00000E+00	0.74545E+11	0.11050E+12	0.18505E+12		
sedim_gp	0.30133E+12	0.22662E+12	0.29051E+12	0.81847E+12		
o2m_aeration	-0.60673E+13	-0.60571E+13	-0.79547E+13	-0.22799E+14		

plankton_r	-0.89228E+13	-0.72064E+13	-0.75995E+13	-0.23729E+14	-0.11019E+14	-0.12709E+14
cau_r	-0.23467E+12	-0.17664E+12	0.00000E+00	-0.41152E+12		
als_r	0.00000E+00	-0.27410E+11	-0.32530E+11	-0.58940E+11		
sedim_r	-0.52847E+13	-0.39744E+13	-0.47169E+13	-0.13976E+14		

o2m_import	mgO2					
Boca lower	0.18607E+14					
Boca upper	-0.28153E+14					

GROSS P/RESP	Boca	Hig	Kua	Alfacn		
	unitless	unitless	unitless	unitless		
Benthos	0.1	0.1	0.0	0.1		
Plankton	2.9	2.9	3.1	2.9		
Plank&Bent	1.8	1.8	1.9	1.9		

MEANS MONTH						

	microE/m2/s	microE/m2/s	m/s	mg/l/d	mg/l/d	mg/l/d
month	Iwx0	Iwx3	Wspeed	PNPmiP	PNPmiS	PRmiP

1	0.17003E+03	0.10870E+02	0.25282E+01	-0.13672E+00	0.41091E+00	-0.35468E-00	...
2	0.36924E+03	0.23605E+02	0.25539E+01	0.34952E+00	0.76381E+00	-0.36000E-00	...
3	0.49500E+03	0.31644E+02	0.28358E+01	0.56903E+00	0.96473E+00	-0.36000E-00	...
4	0.51357E+03	0.32831E+02	0.37176E+01	0.52869E+00	0.10178E+01	-0.36000E-00	...
5	0.60154E+03	0.36455E+02	0.31149E+01	0.67656E+00	0.11041E+01	-0.36000E-00	...
6	0.60984E+03	0.38986E+02	0.26371E+01	0.67111E+00	0.12533E+01	-0.36000E-00	...
7	0.68663E+03	0.43895E+02	0.24680E+01	0.82710E+00	0.12529E+01	-0.36000E-00	...
8	0.80990E+03	0.38990E+02	0.19714E+01	0.71527E+00	0.10766E+01	-0.36000E-00	...
9	0.48889E+03	0.31254E+02	0.18390E+01	0.56000E+00	0.97778E+00	-0.36000E-00	...
10	0.30812E+03	0.24694E+02	0.26980E+01	0.37116E+00	0.80129E+00	-0.36000E-00	...
11	0.24862E+03	0.15894E+02	0.27517E+01	0.57778E-01	0.61778E+00	-0.36000E-00	...
12	0.18341E+03	0.11725E+02	0.27938E+01	-0.45536E-01	0.38687E+00	-0.35952E-00	...
	mg/m2/d	mg/m2/d	mg/m2/d	mg/m2/d	mg/d	mg/d	...
month	BGPced_bo	BGPced_mi	BGPced_ku	BRced_any	o2m_np_p1_miF	o2m_np_p1_miS	...
1	0.41116E+02	0.41116E+02	0.46899E+02	-0.12000E+04	-0.34214E+10	0.11506E+11	...
2	0.54157E+02	0.54157E+02	0.56025E+02	-0.12000E+04	0.94371E+10	0.21387E+11	...
3	0.62893E+02	0.62893E+02	0.67230E+02	-0.12000E+04	0.15364E+11	0.27012E+11	...
4	0.58764E+02	0.58764E+02	0.65736E+02	-0.12000E+04	0.14280E+11	0.28498E+11	...
5	0.73495E+02	0.73495E+02	0.77109E+02	-0.12000E+04	0.16267E+11	0.33154E+11	...
6	0.50968E+02	0.50968E+02	0.53590E+02	-0.12000E+04	0.18120E+11	0.35893E+11	...
7	0.54024E+02	0.54024E+02	0.56226E+02	-0.12000E+04	0.22332E+11	0.35081E+11	...
8	0.49790E+02	0.49790E+02	0.53685E+02	-0.12000E+04	0.19312E+11	0.30144E+11	...
9	0.13422E+03	0.13422E+03	0.14135E+03	-0.12000E+04	0.15120E+11	0.27378E+11	...
10	0.11838E+03	0.11838E+03	0.12371E+03	-0.12000E+04	0.10022E+11	0.22436E+11	...
11	0.82680E+02	0.82680E+02	0.94221E+02	-0.12000E+04	0.15600E+10	0.17298E+11	...
12	0.59201E+02	0.59201E+02	0.69333E+02	-0.12000E+04	-0.12295E+10	0.10888E+11	...
	mg/d	mg/d	unitless	unitless	unitless	unitless	...
month	o2m_imp_U	o2m_ae_miS	GP:R_BENT_bo	GP:R_BENT_mi	GP:R_BENT_ku	GP:R_BENT_ALP	...
1	-0.31977E+11	-0.31692E+10	0.0	0.0	0.0	0.0	...
2	-0.35287E+11	-0.11997E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
3	-0.36652E+11	-0.25079E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
4	-0.32367E+11	-0.29678E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
5	-0.11507E+12	-0.29765E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
6	-0.12002E+12	-0.31163E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
7	-0.12338E+12	-0.38336E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
9	-0.12461E+12	-0.15236E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
8	-0.12576E+12	-0.19688E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
10	-0.11263E+12	-0.16640E+11	0.1	0.1	0.0	0.1	...
11	-0.33702E+11	-0.13029E+11	0.0	0.1	0.0	0.0	...
12	-0.29948E+11	-0.14343E+10	0.0	0.0	0.0	0.0	...

D.5. "R-project" scripts (*.r) to plot some OMMEL results (*.out)

Below there is a list of R scripts used to produced graphs which plot some of the OMMEL results.

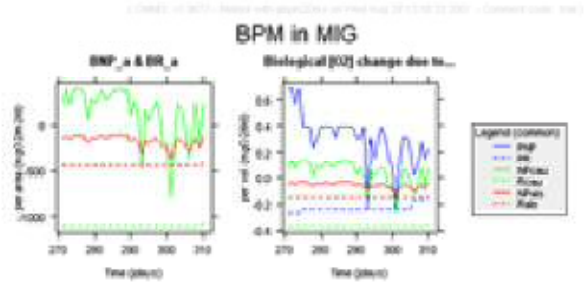
Source code from R scripts has been highlighted here with the web service from http://www.alaide.com/outils_colorsyntaxe.php , which uses itself the [GNU Source-highlight](http://www.gnu.org/software/src-highlight/) from Lorenzo Bettini: <http://www.gnu.org/software/src-highlight/>

N	Script name	Goal	Sample graph produced
1	<code>gommel_typicald_common_functions.r</code>		(None)
2	<code>gommel_all.r</code>	(1) Specify common settings for all graphs (2) Plot output from OMMEL model 2D, v1.7 onwards	(All the graphs below from the "gommel_" series)
3	<code>gommel_do2Db.r</code>	Plot DO results 2D for station "BOCA", v1.0 onwards	
4	<code>gommel_do2Dm.r</code>	Plot DO results 2D for station "MIG", v1.0 onwards	
5	<code>gommel_do2Dk.r</code>	Plot DO results 2D for station "KUA", v1.0 onwards	

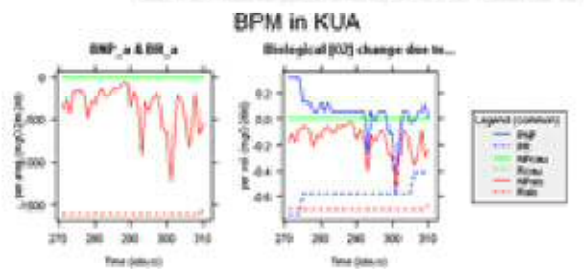
N	Script name	Goal	Sample graph produced
6	gommel_light2D.r	Plot light results 2D, v1.7 onwards	<p>The figure displays two side-by-side plots under the heading 'Light'. The left plot, 'Irradiance in depth (W/m²)', is a 2D heatmap with 'Time (days)' on the x-axis (270-310) and 'Log 10 light (W/m²)' on the y-axis (200-2000). The right plot, 'HSIrad', shows 'Hours' on the y-axis (0-10) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). Two legends are provided: one for the left graph (I-0, I-1, I-2, I-3, I-4) and one for the right graph (Photos. upper, Photos. lower, HSI, Air).</p>
7	gommel_windimp.r	Plot hourly values of wind speed and aeration, plus O2 import through bay mouth. v1.81 onwards	<p>The figure is titled 'Import & Wind aeration' and contains two plots. The left plot shows 'Hourly mean, at z=1.50m' with 'Wind speed (m/s)' on the y-axis (0-15) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). The right plot shows '[O2] import in BOCA due to...' with 'mg vol (mg/m³)' on the y-axis (-2 to 2) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). A legend for the right graph includes 'Wind aeration', 'imp. upper', and 'imp. lower'.</p>
8	gommel_izws_m.r	Calculate and plot daily means for light and wind speed. v1.81 onwards	<p>The figure is titled 'Daily means for Irradiance at 5 depths & Wind speed' and contains two plots. The left plot shows 'Irradiance at z=0,z=1,z2,z3' with 'Iz (W/m²)' on the y-axis (0-800) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). The right plot shows 'Daily mean' with 'Wind speed (m/s)' on the y-axis (0-8) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310).</p>
9	gommel_doaer.r	Plot DO_aeration results for all stations, 2D, v1.80 onwards	<p>The figure is titled 'DO rate of change due to Wind aeration' and contains six subplots arranged in a 2x3 grid. The top row shows 'DO rate of change' for stations BOCA, MO, and VJA. The bottom row shows 'DO rate of change' for the same stations. Each plot has 'Time (days)' on the x-axis (270-310) and 'DO rate of change' on the y-axis.</p>
10	gommel_bpm2Db.r	Plot Benthic and Planktonic metabolism for station "BOCA", 2D, v1.0 onwards	<p>The figure is titled 'BPM in BOCA' and contains two plots. The left plot shows 'BPM_a & BPM_p' with 'BPM (mg/m³/h)' on the y-axis (-200 to 0) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). The right plot shows 'Biological [O2] change due to...' with 'mg vol (mg/m³/h)' on the y-axis (-0.4 to 0.2) and 'Time (days)' on the x-axis (270-310). A legend for the right graph includes 'BPM', 'BPMa', 'BPMp', 'BPMa', 'BPMp', and 'BPM'.</p>

N	Script name	Goal	Sample graph produced
---	-------------	------	-----------------------

11 gommel_bpm2Dm.r Plot Benthic and Planktonic metabolism for station "MIG", 2D, v1.0 onwards



12 gommel_bpm2Dk.r Plot Benthic and Planktonic metabolism for station "KUA", 2D, v1.0 onwards



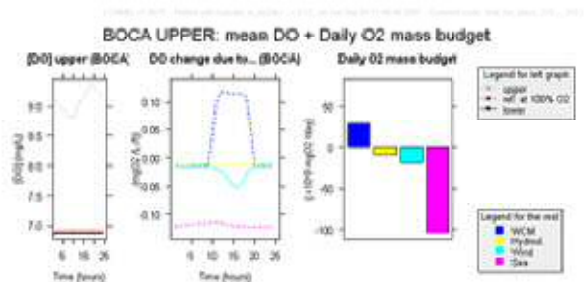
13 typicald_all.r Calculate a Typical Day (producing means to each hour of the day for all days in the period), and results saved in files and plotted. From OMMEL 2D, v1.8

(All the graphs below from the "typicald_" series)

14 typicald_m_common_routines.r Common routines to plot graphs of the "typicald_" series upper and lower of all stations BOCA, MIG and KUA.

(none; used in the following typicald_...r script series)

15 typicald_m_do2db.r Plot DO results for the BOCA UPPER box (from ommel 2D, v1.80).



N	Script name	Goal	Sample graph produced
		<p>Plot DO results for the BOCA LOWER box (from ommel 2D, v1.80).</p>	<p>BOCA LOWER: mean DO + Daily O₂ mass budget</p>
16	typicald_m_do2dm.r	<p>Plot DO results for the MIG UPPER box (from ommel 2D, v1.80).</p>	<p>MIG UPPER: mean DO + Daily O₂ mass budget</p>
		<p>Plot DO results for the MIG LOWER box (from ommel 2D, v1.80).</p>	<p>MIG LOWER: mean DO + Daily O₂ mass budget</p>
17	typicald_m_do2dk.r	<p>Plot DO results for the KUA UPPER box (from ommel 2D, v1.80).</p>	<p>KUA UPPER: mean DO + Daily O₂ mass budget</p>
		<p>Plot DO results for the KUA LOWER box (from ommel 2D, v1.80).</p>	<p>KUA LOWER: mean DO + Daily O₂ mass budget</p>

D.6. Bibliography

Bronken Gundersen, V., 2006. MATLAB commands in numerical Python (NumPy). *Matrix comparing commands syntax in Matlab/Octave, Numerical Python, SciLab, Gnuplot, and R.*: 17.

Correa, J. C. and González, N., 2002. Gráficos Estadísticos con R. *Posgrado en Estadística, Universidad Nacional-Sede Medellín*: 299.

Fortran Company, T., 2005. Fortran Tools: 98.

González, A., *et al.*, 2000. Introducción a R. Notas sobre R: Un entorno de programación para Análisis de Datos y Gráficos.: 106.

Paniagua Valle, J. C. and Solè Sabaté, A., 2007. Introducció a la programació en Fortran 77. *Textos docents*, 128:

Paradis, E. and Ahumada, J. A., 2003. R para Principiantes: 61.

Soetaert, K., *et al.*, 2002. FEMME, a flexible environment for mathematically modelling the environment. *Ecological Modelling*, 151 177-193.

Sun Microsystems, I., 1995. Fortran 90 User's Guide: 250.

Venables, W. N., *et al.*, 2000. An Introduction to R. Notes on R: A Programming Environment for Data Analysis and Graphics, (Version 2.5.1 (2007-06-27)): 100.

D.7. OMMEL Legal Notice

ENGLISH: Creative Commons: <http://creativecommons.org/licenses/GPL/2.0/>

This page is available in the following languages:

[Afrikaans](#) [Български](#) [Català](#) [Dansk](#) [Deutsch](#) [English](#) [English \(CA\)](#) [English \(GB\)](#) [English \(US\)](#) [Esperanto](#) [Castellano Castellano \(AR\)](#) [Español \(CL\)](#) [Castellano \(MX\)](#) [Euskara](#) [Suomeksi](#) [français](#) [français \(CA\)](#) [Galego](#) [עברית](#) [hrvatski](#) [Magyar](#) [Italiano](#) [Macedonian](#) [Melayu](#) [Nederlands](#) [Sesotho sa Leboa](#) [polski](#) [Português](#) [Português \(PT\)](#) [svenska](#) [slovenski jezik](#) [isiZulu](#)



GNU General Public License, [Free Software Foundation](#)

The GNU General Public License is a [Free Software](#) license. Like any Free Software license, it grants to you the four following freedoms:

0. The freedom to run the program for any purpose.
1. The freedom to study how the program works and adapt it to your needs.
2. The freedom to redistribute copies so you can help your neighbor.
3. The freedom to improve the program and release your improvements to the public, so that the whole community benefits.

You may exercise the freedoms specified here provided that you comply with the express conditions of this license. The principal conditions are:



You must conspicuously and appropriately publish on each copy distributed an appropriate copyright notice and disclaimer of warranty and keep intact all the notices that refer to this License and to the absence of any warranty; and give any other recipients of the Program a copy of the GNU General Public License along with the Program. Any translation of the GNU General Public License must be accompanied by the GNU General Public License.



If you modify your copy or copies of the program or any portion of it, or develop a program based upon it, you may distribute the resulting work provided you do so under the GNU General Public License. Any translation of the GNU General Public License must be accompanied by the GNU General Public License.



If you copy or distribute the program, you must accompany it with the complete corresponding machine-readable source code or with a written offer, valid for at least three years, to furnish the complete corresponding machine-readable source code.

Any of the above conditions can be waived if you get permission from the copyright holder.

Your fair dealing and other rights are in no way affected by the above.

This is a human-readable summary of the Legal Code (the full [GNU General Public License](#)):

<http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>

[Disclaimer](#)

[Learn how to distribute your work using this license](#)

[Creative Commons](#)

CATALÀ: Creative Commons: <http://creativecommons.org/licenses/GPL/2.0/deed.ca>

Aquesta pàgina també està disponible en els idiomes següents:

[Afrikaans](#) [Български](#) [Català](#) [Dansk](#) [Deutsch](#) [English](#) [English \(CA\)](#) [English \(GB\)](#) [English \(US\)](#) [Esperanto](#) [Castellano](#) [Castellano \(AR\)](#) [Español \(CL\)](#) [Castellano \(MX\)](#) [Euskara](#) [Suomeksi](#) [français](#) [français \(CA\)](#) [Galego](#) [עברית](#) [hrvatski](#) [Magyar](#) [Italiano](#) [Macedonian](#) [Melayu](#) [Nederlands](#) [Sesotho sa Leboa](#) [polski](#) [Português](#) [Português \(PT\)](#) [svenska](#) [slovenski jezik](#) [isiZulu](#)



Llicència GNU General Public License de la [Free Software Foundation](#)

La GNU General Public License és una llicència de [programari lliure](#). Com qualsevol llicència de programari lliure, us atorga les llibertats següents:

0. La llibertat d'executar el programa per a qualsevol finalitat.
1. La llibertat per estudiar com funciona el programa i per adaptar-lo a les vostres necessitats.
2. La llibertat de redistribuir-ne còpies per ajudar als vostres veïns.
3. La llibertat per millorar el programa i difondre les millores al públic, per tal que tota la comunitat se'n beneficiï.

Podeu exercir les llibertats especificades aquí sempre que compliu amb les condicions d'aquesta llicència. Les condicions principals d'aquesta llicència són:



En cada còpia que distribuïu, heu de difondre notòriament i apropiadament un avís referent als drets d'autor i una exoneració de responsabilitat, mantenir intactes tots els avisos referents a aquesta llicència i a l'absència de qualsevol garantia; i donar als altres recipients del programa una còpia de la GNU General Public License juntament amb el programa. Qualsevol traducció de la GNU General Public License ha d'estar acompanyada per la GNU General Public License.



Si modifiqueu la vostra còpia o còpies del programa o alguna de les seves parts, o desenvolueu un programa basat en ell, podeu distribuir l'obra resultant sempre amb la GNU General Public License. Qualsevol traducció de la GNU General Public License ha d'anar acompanyada de la GNU General Public License.



Si copieu o distribuïu el programa, heu d'acompanyar-lo del corresponent codi font legible per màquines o un oferiment escrit, vàlid almenys per tres anys, per subministrar el corresponent codi font complet.

Alguna d'aquestes condicions pot no aplicar-se si obteniu el permís del titular dels drets d'autor.

Els drets derivats d'usos legítims o altres limitacions reconegudes per llei no queden afectats per l'anterior

Això és un resum fàcilment llegible del Codi Legal (la [Llicència Pública General de GNU](#) completa). També hi ha disponible [una traducció al portuguès](#).

[Advertiment](#)

[Learn how to distribute your work using this license](#)

Annex E. Llistat de Figures

Annex E. Llistat de Figures

- Figura 0.1 Model conceptual sobre com interacciona la hipòxia amb els estadis de successió o la complexitat de l'organització de la comunitat (modificat a partir de Diaz i Rosenberg 1995). L'estadi III és una comunitat madura, l'estadi II és una comunitat transitòria i l'estadi I una comunitat pionera o oportunista (estadis de successió segons Rhoads i Germano 1986). L'escala de temps és relativa, amb l'interval de temps per a la davallada progressiva de l'ecosistema essent depenent del sistema, però els sistemes estudiats per Diaz i Rosenberg (1995) segueixen aquest mateix patró general..... 5
- Figura 1.1 Esquema d'un fiord (modificat a partir de Stigebrandt 2001). 16
- Figura 1.2 Badia dels Alfacs (Delta de l'Ebre): (a) localització geogràfica del lloc d'estudi amb detall del mapa batimètric, i de les estacions de mostreig "Boca", B, "Mig", M i "Cua", C; (b) imatge de satèl·lit on es poden apreciar les llacunes costaneres de l'Encanyissada (esquerra) i la Tancada (dreta), envoltades de camps d'arròs (parcel·les poligonals) i l'entramat de canals de rec i desguàs de la plana deltaica que vessen a la badia. L'anomenat de vegades "punt central" correspon a l'estació "Mig", M. 21
- Figura 1.3 Batimetria dels Alfacs en 3 dimensions. 22
- Figura 1.4 Principals canals d'entrada d'aigua dolça. (1. Canal de la *Sèquia de l'Ala*; 2. Canal de *l'Encanyissada*; 3. Canal del *Desguàs General* o de *Campredó*; E. Encanyissada; T. Tancada; D. Depuradora de Sant Carles de la Ràpita. 23
- Figura 1.5 Model de caixes aplicat a la Badia dels Alfacs: (a) compartiments en que es divideix la badia, i noms dels fluxos entre compartiments, segons model de caixes de Officer (1980), i (b) fluxos mitjans durant (b1) *canals oberts* (maig-novembre) i (b2) *canals tancats* (desembre - abril). S'assumeix estat estacionari i salinitat i fluxos d'aigua dolça mitjans de cada període de càlcul de fluxos advectionals i d'intercanvi (de Camp, 1994). Unitats: fluxos d'aigua, $\times 10^6 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (fletxes) i salinitat, en psu (valor enmig dels compartiments). 26
- Figura 1.6 Fluxos d'entrada a la badia per sobre del ressalt (F_{O1}), estimats pel mètode del model de caixes en estat estacionari (Officer 1980). Veure text per més detalls..... 34
- Figura 1.7 Oscil·lació de l'alçada de la columna d'aigua a la badia dels Alfacs: (a) setembre de 1997 (5 dies), (b) setembre-octubre de 1998 (29 dies), (c) novembre-desembre de 1998 (36 dies). Dades de sonda multiparamètrica instal·lada en estació mig fons a 40cm sobre el sediment, corregides per a la pressió atmosfèrica (en el 0 es mostren les dades del gràfic (a) sense corregir). Els valors dels dies julians de (b) i (c) marquen l'inici del dia en qüestió..... 35
- Figura 1.8 Cabal d'aigua diari total entrat (+) o sortit (-) de la badia dels Alfacs per tal de complir les diferències d'alçada de la columna d'aigua entre dies consecutius enregistrades in situ: (a) setembre de 1997 (3 d), (b) setembre-octubre de 1998 (28 dies), (c) novembre - desembre de 1998 (33 dies). Els valors dels dies julians marquen l'inici del dia en qüestió..... 36

Figura 1.9 Exemple de registre de velocitat i direcció del corrent per sobre del ressalt d'entrada a la badia: (a) vectors de velocitat del corrent en coordenades geogràfiques estàndard, (b) velocitat absoluta del corrent en la seva direcció corresponent, equivalent a la intensitat del vector de velocitat de corrent (cm s^{-1}), (c) component parcial del corrent (cm s^{-1}) segons la seva base ortogonal estàndard sense rotar, V, en direcció N-S, i (d) igual que (c) però en component U (cm s^{-1}), en direcció E-O. Les dades són mitjanes horàries per al període del 12 de setembre al 8 d'octubre de 1997.....	37
Figura 1.10 Distribució de les orientacions dels corrents d'aigua mesurats: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17-22 de setembre 1998, (d) 15-20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. S'observa com predominen dues direccions, 70° (d'entrada a la badia) i 250° (de sortida).....	38
Figura 1.11 Component V' (al llarg de l'eix principal de la badia) del registre de velocitat del flux d'entrada (cm s^{-1}) mesurat pel correntímetre a Alfacs en l'estació Boca: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17 setembre - 22 setembre 1998, (d) 15 octubre - 20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. Les dades originals són registres cada 10 minuts. Els dies julians són començats a comptar des de l'1 de gener de l'any en qüestió. Valors positius són d'entrada a la badia dels Alfacs, i negatius de sortida.	39
Figura 1.12 Component U' (a través de l'eix principal de la badia) del registre de velocitat del flux d'entrada (cm s^{-1}) mesurat pel correntímetre a Alfacs en l'estació Boca: (a) 12 setembre - 8 octubre 1997, (b) 9 octubre - 12 novembre 1997, (c) 17 setembre - 22 setembre 1998, (d) 15 octubre - 20 octubre 1998, (e) 11 novembre - 9 desembre 1998. Les dades originals són registres cada 10 minuts. Els dies julians són començats a comptar des de l'1 de gener de l'any en qüestió. Valors positius són en sentit cap a terra ferma, i els negatius, en sentit a la península de la "Punta de la Banyà".....	40
Figura 1.13 Fluxos del corrent net residual diari just per sobre del ressalt d'entrada en direcció al llarg de l'eix principal de la badia (component V'). Valors positius volen dir d'entrada i negatius de sortida. El número de dia julià de l'eix de les ordenades marca l'inici del dia en qüestió.	41
Figura 1.14 Velocitat i direcció del vent a l'estació meteorològica d'Amposta del DARP. Les dades són mitjanes diàries en 1997 i 1998.	42
Figura 1.15 Evolucions al llarg de 1997 i 1998 de (a) velocitat del vent mitjana diària (m s^{-1}), (b) Direcció del vent mitjana diària ($^\circ$), (c) Balanç hídric acumulat diari per via atmosfèrica (Precipitació Total menys Evapotranspiració de referència, en mm). Els gràfics de la dreta (x') representen els histogrames de freqüències d'aparició de cada valor, en unitats percentuals. Dades de l'observatori d'Amposta del DARP.....	43
Figura 1.16 Diferència de pressió atmosfèrica diària en 1997 i 1998: (a) valors mitjans diaris de diferència entre un dia i el del dia anterior (mbar), (a') histograma de freqüències. Dades de l'estació meteorològica d'Amposta del Servei de Meteorologia de Catalunya.	44
Figura 1.17 Diagrama de dispersió entre el flux net residual diari i la velocitat longitudinal del vent, ambdós eixos mostren les seves components V'. Es mostra la recta de regressió lineal entre ambdues variables: $Y=9.16+2.52X$ ($r=0.47$, $p<0.001$, $n=103$).....	46

- Figura 1.18 Correlació creuada entre la velocitat V' del vent i la velocitat V' del corrent de fons per sobre del ressalt. Fet a partir de mitjanes horàries de les dades. Cal recordar que la direcció del vent indica d'on ve el vent, i la del corrent cap a on va, raó per la qual els vents V' positius van en sentit oposat al dels corrents V' de fons positius. Valors de correlació positiva indiquen que el vent que bufa en un sentit està potenciant la circulació d'aigua de fons en sentit contrari dins de la mateixa direcció V' d'actuació. 46
- Figura 1.19 Correlació creuada entre la precipitació neta (PPT-Eto) i la velocitat V' del corrent de fons per sobre del ressalt. Fet a partir de mitjanes horàries de les dades. 47
- Figura 1.20 Anàlisi de correlació depenent d'escala (SDC) entre: 1^a sèrie (dalt): velocitat V' del corrent sobre el ressalt, i 2^a sèrie (esquerra): velocitat V' del vent. Les dades són mitjanes horàries de cada variable entre 11 de novembre i 8 de desembre de 1998. Mida del fragment d'escala: 12h. Els dos requadres verticals s'han dibuixat amb l'únic objectiu de ressaltar les àrees del gràfic que corresponen als intervals de temps en que la primera sèrie mostra acoblament amb la segona. Veure text per a més informació sobre el mètode. 48
- Figura 1.21 Anàlisi de la correlació depenent d'escala (SDC) entre: 1a Sèrie (dalt, a), alçada de la columna d'aigua, i 2a Sèrie (esquerra, b), velocitat V' del corrent sobre el ressalt. La freqüència de dades és cada 10 min, entre l'11 i el 19 de novembre de 1998. Mida del fragment d'escala: 2h. S'ha representat també per comoditat d'interpretació dels patrons de l'SDC altres sèries temporals a sota: (c) velocitat U' del corrent, (d) velocitat del vent V' , (e) velocitat del vent U' . Veure text per a més informació sobre el mètode. 49
- Figura 1.22 Anàlisi de la correlació depenent d'escala (SDC) entre: (dalt, a), alçada de la columna d'aigua, (esquerra superior, b), velocitat V' del corrent sobre el ressalt, (esquerra mig, c) velocitat V' del vent, (esquerra inferior, d), velocitat U' del vent. La freqüència de dades és cada 10 min, a partir de les 13:00h de l'11 de novembre de 1998 (1.7 dies). Mida del fragment d'escala: 2h. Veure text per a més informació sobre el mètode. 51
- Figura 2.1 Intercalibració entre els sensors de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i els del LICOR LI1000 manual. Pir. =Piranòmetre ($W m^{-2}$); Quant.= Quantòmetre ($\mu mol m^{-2} s^{-1}$). Els valors dels dos quantòmetres en la calibració són de llums aquàtiques subsuperficials. Llegendes de la figura en format "Eix X vs. Eix Y". Les respectives funcions i els seus coeficients es troben a la Taula 2.4. 73
- Figura 2.2 Climatologia dels Alfacs entre 1992 i 1999. (a) Temperatura (màxima, mitjana i mínima, en $^{\circ}C$), (b) Humitat relativa (mínima i mitjana, en %), (c) Velocitat del vent (màxima i mitjana, en $m s^{-1}$), (d) Radiació Solar (global i neta, en $MJ m^{-2}$), (e) intercanvi d'aigua amb l'atmosfera (Precipitació Total-PPT, Evapotranspiració de referència-ETo, i balanç hídric net o precipitació neta, mesura com PPT-Eto; totes tres en mm ó $l m^{-2}$). Les dades procedeixen de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i corresponen a mitjanes diàries, excepte les de precipitació i evaporació, que corresponen a valors acumulats diaris. 77
- Figura 2.3 Distribució de freqüències de l'orientació del vent. Valors horaris de 1997 de l'estació meteorològica d'Amposta (n=8759): (a) hivern, (b) primavera, (c) estiu, (d) tardor. 78
- Figura 2.4 Coeficient d'extinció de la llum (k_z) mesurat *in situ* a la columna d'aigua (m^{-1}). 79

Figura 2.5 Irradiància subaquàtica calculada a diverses fondàries de la columna d'aigua a partir de l'extinció exponencial negativa amb el coeficient k_z	79
Figura 2.6 Fondària de la picnoclina a la badia dels Alfacs: (a) valors discrets per cada moment de mostreig, (b) histograma de freqüències de l'aparició de cada fondària. Les dades corresponen al període 1996 i 1998 (CNA-DARP).....	80
Figura 2.7 Diferències de salinitat (psu) entre la capa inferior i la capa superficial del punt central de la Badia dels Alfacs. Dades setmanals de 1990-1998 (n=280).....	80
Figura 2.8 Sèries temporals de (a) salinitat (psu), (b) temperatura (°C) i (c) oxigen dissolt (mg l^{-1}), corresponents a l'aigua superficial (sèrie clara) i fonda (sèrie fosca) del punt mig de la Badia dels Alfacs, entre 1990 i 1998. Les línies contínues representen les tendències significatives al llarg del temps (per la salinitat superficial, $S=33.7+ 2.72 * 10^{-4} T$, $p<0.01$, T en dies, i per la profunda, $S=36.5 - 1.37 * 10^{-4} T$, $p<0.05$).....	81
Figura 2.9 Efecte de la velocitat del vent (m s^{-1}) sobre l'estratificació de la columna d'aigua, representada per la diferència de salinitat mitjana entre la capa de fons (S_2 , en psu) i la de superfície (S_5). Les dades són mitjanes mensuals del període 1992-1997 (n=61). La intersecció de la recta de regressió amb l'eix horitzontal és a $x=5.15 \text{ m s}^{-1}$, i indica la velocitat del vent estimada a la qual es perdria totalment l'estratificació.	82
Figura 2.10 Evolució mensual mitjana durant la dècada dels 90 de: (a) salinitat (psu), (b) PPT-ETo acumulada (mm ó l m^{-2}), (c) velocitat màxima diària del vent (m s^{-1}), (d) velocitat mitjana del vent (m s^{-1}), (e) oxigen dissolt de tota la columna d'aigua (mg l^{-1}), (f) oxigen dissolt per capes, superficial de color blanc, fonda de color negre.	83
Figura 2.11 Evolucions de: (a) salinitat mitjana setmanal per tota la columna d'aigua (psu), (b) PPT-ETo acumulada diària (mm), (c) velocitat del vent mitjana diària (m s^{-1}), (d) orientació del vent mitjana diària (°), durant el període de 1996-98.....	84
Figura 2.12 Evolució de (a) salinitat (psu), (b) temperatura (°C) i (c) oxigen dissolt (% de saturació) del punt mig de la Badia dels Alfacs (1996-98).	85
Figura 2.13 Evolució de la temperatura mínima (°C) de l'aigua de la capa fonda al llarg de la dècada dels anys 90.	87
Figura 2.14 Relació entre temperatura mínima diària de l'aire i la temperatura de l'aigua de fons del punt central. Dades aparellades de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i dels diversos programes de recerca de qualitat de l'aigua a la Badia dels Alfacs, durant el període 1992-1998. La regressió lineal és estadísticament significativa	88
Figura 2.15 Distribució de concentracions d'oxigen dissolt a la capa profunda del punt central de la badia dels Alfacs. Dades setmanals entre 1990 i 1998 (n. anuals=12-38). A l'esquerra de la línia vertical queden els valors corresponents a situacions d'hipòxia.	89
Figura 2.16 Salinitat del punt central i precipitació neta al llarg de la dècada dels 90. (a) Mitjanes anuals de salinitat, (b) precipitació neta acumulada anual.	90
Figura 2.17 Concentració de nutrients i clorofil·la a en la columna d'aigua de la Badia dels Alfacs entre 1991 i 1995: (a) NH_4^+ , (b) NO_2 , (c) NO_3^- , (d) PO_4^{3-} , (e) N/P, (f) Clorofil·la a. Dades del Centre Nacional d'Aqüicultura-IRTA, expressades en μM excepte les de clorofil·la a, en mg m^{-3}	91

- Figura 2.18 Evolució estacional de la concentració en la columna d'aigua de la badia dels Alfacs de: (a) amoni, (b) nitrit, (c) nitrat, (d) fosfat, (e) N/P, (f) clorofil·la a. Les unitats dels nutrients són μM i les de Cla són mg m^{-3} . Les dades són mitjanes de cada més de l'any per a tots els anys de que es disposa dades (* entre 1991 i 1995 excepte per Cla, entre 1990 i 1995), separades per capa superficial (sup.) i capa profunda (fons)..... 92
- Figura 2.19 Histograma de freqüències de la concentració d'amoni (NH_4^+ , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 96
- Figura 2.20 Histograma de freqüències de la concentració de nitrit (NO_2 , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 97
- Figura 2.21 Histograma de freqüències de la concentració de nitrat (NO_3^- , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 98
- Figura 2.22 Histograma de freqüències de la concentració de fosfat (PO_4^{3-} , en μM) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 99
- Figura 2.23 Histograma de freqüències del quocient N/P (concentració de nitrogen inorgànic dissolt total dividit per la concentració de fosfat) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, i (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 100
- Figura 2.24 Histograma de freqüències de la concentració de clorofil·la a (Cla, en mg m^{-3}) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997: (a) per tota la columna d'aigua, (b) capa superficial (*miS*) i profunda (*miF*) per separat. Dades de diverses procedències (veure text per més detalls). 101
- Figura 2.25 Relació entre el nitrat (NO_3^-) i fosfat (PO_4^{3-}) respecte la clorofil·la a (Cla): (a) concentració de nitrat respecte Cla, (b) concentració de fosfat respecte la de Cla. Dades setmanals del Centre Nacional d'Aqüicultura de l'IRTA entre 1990 i 1995 de la capa superficial i profunda de columna d'aigua de la Badia dels Alfacs. 102
- Figura 2.26 Distribució de freqüències de concentració de nutrients en l'aigua dels canals d'entrada a la badia dels Alfacs, en 1986-87 i 1996-97: (a) NH_4^+ , (b) NO_2 , (c) NO_3^- , (d) PO_4^{3-} , (e) N/P. Els canals considerats són el del Desguàs General, l'Encanyissada i la Sèquia del l'Ala, sense comptar amb el de la depuradora. 105
- Figura 2.27 Relació entre la salinitat mitjana de la columna d'aigua i el balanç hidric amb l'atmosfera (precipitació menys ET_0). Dades mensuals dels anys 1992 a 1997 ($n=61$), mitjanes per la salinitat i acumulades per al balanç hidric..... 106

Figura 3.1 Esquema de l'estructura simplificada d'un estuari amb dues capes (caixes negres), que es mantenen en estat estacionari, rebent aportos d'aigua dolça de l'exterior i aigua salada de mar obert (veure text per més detalls). Notació: Q_e =Cabal d'aigua d'entrada, Q_a =Cabal ascendent, Q_i =Cabal d'intercanvi, Q_{ad} =Cabal d'aigua dolça, Q_{ev} =Cabal evaporat, S_e =Salinitat d'entrada, S_f =Salinitat del fons, S_s =Salinitat superficial.	124
Figura 3.2 Punts de mostreig del mapa d'oxigen de la badia dels Alfacs (25/09/97), representats pels símbols p1 a p6, més els de les estacions <i>Exterior (Ext.)</i> , <i>Boca</i> , <i>Mig</i> i <i>Cua</i>	126
Figura 3.3 Evolució dels perfils d'oxigen dissolt (O_2 , en %) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).	130
Figura 3.4 Evolució dels perfils de Salinitat (S) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).	131
Figura 3.5 Evolució dels perfils de Temperatura (T, en °C) a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).	132
Figura 3.6 Evolució dels perfils de σ_T a la badia dels Alfacs durant el període d'hipòxia de 1997. S'ha assignat lletres correlatives (a - e) a les diferents setmanes de mostreig per ordre cronològic (17/09/97, 25/09/97, 01/10/97, 09/10/97, 22/19/97).	133
Figura 3.7 Evolució horària, en el punt central de la badia, de: (a) salinitat, (b) temperatura, (c) oxigen dissolt, (d) velocitat de canvi d' O_2 , i (e) alçada no corregida de la columna d'aigua (a partir de registre de pressió hidrostàtica, sense corregir per la pressió atmosfèrica; veure Figura 3.9 per a la sèrie corregida).	134
Figura 3.8 Evolució horària de les variables meteorològiques entre el 16 i el 21 de setembre de 1997: (a) Temperatura aèria (°C), (b) Velocitat del vent ($m s^{-1}$), (c) Direcció de procedència del vent (graus de desviació en sentit horari respecte el Nord), (e) Radiació Solar ($W m^{-2}$), Balanç hídric per via atmosfèrica, PPT-ETo (mm), Pressió atmosfèrica (mbar). Totes les dades procedeixen de registres horaris de l'estació meteorològica Amposta-DARP, excepte les de Pressió Atmosfèrica, que són cada 30' de l'estació Amposta-DMA.	135
Figura 3.9 Correcció de l'alçada de la columna d'aigua del registre baromètric de la sonda multiparamètrica submergida a partir del registre de Pressió atmosfèrica de l'estació meteorològica Amposta-DMA. S'ha assumit la relació de canvi de +1mbar = -1 cm. (veure text per a més detalls). S'ha d'entendre l'alçada corregida de la columna d'aigua com l'alçada que s'hauria observat si no s'hi haguessin donat canvis de pressió atmosfèrica.	136
Figura 3.10 Seccions en fondària de la massa d'aigua pobre en oxigen el 25 de setembre de 1997: (a) a 2 m de fondària, (b) 4 m, (c) 5 m, (d) 6m.	137
Figura 3.11 Mapa d'oxigen dissolt al fons de la badia dels Alfacs el 25 de setembre de 1997. Els valors en gris clar són expressats en % de saturació, i els valors en blanc i cursiva són concentracions expressades en $mg l^{-1}$	138

- Figura 3.12 Evolució temporal de: (a) oxigen dissolt (% saturació), (b) velocitat del vent ($m s^{-1}$), (c) salinitat (psu), (d) temperatura ($^{\circ}C$), (e) diferència de $SIGMA_T$ entre les capes de fons i superfície, i (f) flux net residual ($\times 10^6 m^3 d^{-1}$). Els valors d'oxigen, salinitat, i temperatura són valors setmanals, mitjans per tota la capa de fons (els tres darrers metres de la columna d'aigua) al punt central de la badia; els de vent són valors mitjans diaris de l'estació Amposta-DARP; els de flux net residual positius són d'entrada d'aigua a la badia. Es mostren les sèries de dades de 1996 (gris) i 1997 (negre)..... 139
- Figura 3.13 Evolució de (a) salinitat, (b) temperatura i (c) oxigen dissolt del punt mig de la badia dels Alfacs (1991). L'eix de les ordenades inferior està en dies julians a partir de 01/01/1991, i el superior en els mesos de l'any. L'origen d'aquestes dades és diferent que el de la seqüència de transectes de setembre de la Figura 3.18, i es troben mancades del registre de les tres variables entre el 20/08 i el 23/09. S'han sobreimprès alguns valors discrets prop del dia 270 per facilitar la lectura dels perfils verticals donats en aquesta data (veure explicació al text). Les línies discontinues s'han dibuixat de forma arbitrària. 140
- Figura 3.14 Evolució de la radiació neta mitjana anual (radiació global arribada menys radiació emesa) en $MJ m^{-2}$, rebuda per l'estació meteorològica d'Amposta-DARP (a partir de dades mostrades a la Figura 2.2d. 141
- Figura 3.15 Fonts d'energia cinètica turbulenta en un sistema aquàtic somer, a partir de Svendsen (1986): (a) entrada externa d'energia, (b) estrès de fricció generat pel corrent, (c) el trencament d'ones internes en una piconclina, i (d) el trencament d'ones internes sobre un contorn amb pendent en direcció vertical. 146
- Figura 3.16 Distribució de concentracions d' O_2 en % de saturació, a la Badia dels Alfacs en estiu-tardor de 1990. Tret de Camp (1994). 147
- Figura 3.17 Mapa horitzontal de l'anòxia sobre el fons de l'estuari en el període descrit per Figura 3.16c. Tret de Camp (1994). 148
- Figura 3.18 Evolució de la distribució de saturacions d'oxigen en la capa profunda de l'aigua de la badia en relació amb el corrent net residual (entrada) mesurat a la boca de la badia promitjat per les 72 hores anteriors a cada distribució (any 1991). Tret de Camp (1994)..... 149
- Figura 4.1. Evolució de la demanda bioquímica d'oxigen en cinc dies (DBO_5) mitjana de la badia dels Alfacs, expressada per la temperatura de camp. Les barres d'error corresponen als errors estàndard de les estacions de mostreig de cada incubació (n entre 8 i 10)..... 163
- Figura 4.2. Relació entre consum d'oxigen dissolt (OD) estimat per consum de carboni orgànic dissolt (COD) més particulat (COP) assumint relació estequiomètrica C:O com a 1:1, i la respiració observada per la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO_5). Les sigles mostrades corresponen a les estacions de mostreig exterior fons (exF), boca fons (boF), mig fons (miF), cua fons (cuF), cua superficial (cuS), mig sup. (miS), boca sup. (boS), exterior sup. (exS), plataforma nord cua (PNc), plataforma nord mig (PNm), plataforma nord boca (PNb), i plataforma sud (PS). 172
- Figura 4.3. Regressions lineals entre la concentració de clorofil·la a (Cla) i (a-e) la de carboni orgànic particulat (COP) en escala doble logarítmica, o (f-j) entre Cla i la concentració d'oxigen dissolt. (a,

f) totes les dades, (b, g) hivern, (c, h) primavera, (d, i) estiu, (e, j) tardor. Els cercles blancs corresponen a valors fora de rang o "outliers" (veure text per més detalls).	174
Figura 4.4. Productivitat mitjana del fitoplàncton (P_m^{Cl} , en $mg\ O_2\ mg\ Cl.a^{-1}\ h^{-1}$) de diferents sistemes marins costaners, fonamentalment llacunes (total de les barres ratllades). S'assenyalen en gris els que corresponen a badies. A partir de Nixon (1986); cal tenir en compte que fins els anys 80 la majoria dels estudis es feien a partir d'incubacions amb ^{14}C	177
Figura 4.5. Canvi net d'oxigen del plàncton (CNP) diari a la capa superior, per compartiments. Llegendat: boS, miS, cuS representen els compartiments superficials de les estacions <i>Boca</i> , <i>Mig</i> i <i>Cua</i> , respectivament. Es mostra també l'equació de la regressió lineal (R.L.) entre ambdues variables.	178
Figura 4.6. Relació entre la suma de la velocitat de canvi net planctònic d'oxigen més la respiració (CNP+R, en $mgO_2\ l^{-1}\ d^{-1}$) i la clorofil·la a (en $mg\ m^{-3}$), en experiments de mesocosmos amb tres graus de turbulència: (a) baixa, (b) mitja i (c) alta. m=pendent de la recta. Elaborat a partir de dades de Petersen <i>et al.</i> (1998).	179
Figura 4.7. Perfils en fondària de (a) salinitat, (b) temperatura, (c) irradiància subaquàtica, i (d) oxigen dissolt, en el punt central dels Alfacs al llarg de 1997. Dades de (a), (b) i (d) ja mostrades a la Figura 2.18, i les de (c) han estat calculades a partir de la metodologia explicada al Capítol 1. Les marques dels eixos d'abscisses corresponen a mesos de 30 dies.	181
Figura 4.8. Flux d' O_2 de l'aigua a l'aire en funció de la velocitat del vent ($m\ s^{-1}$) i per varies sobresaturacions d'oxigen dissolt, considerant fixes salinitat a 35 psu i temperatura de l'aigua a 20 °C. Mètode de càlcul explicat al text. Valors negatius de FDO_{vent} indiquen sortida d'oxigen cap a l'atmosfera.	184
Figura 4.9. Distribució de la velocitat del vent al Delta de l'Ebre. 1997. Les dades són mitjanes horàries de l'estació meteorològica <i>Amposta-DARP</i>	185
Figura 5.1. Punts de mostreig del mapa de distribució de macroalgues bentòniques. Els cercles corresponen al mostreig espacial i les lletres dels codis fan referència a la data de mostreig (a=14/04/97, jn=9/06/97, jl=9/07/97, s=25/09/97, f=17/feb/98). Els quadrats indiquen els llocs de mostreig de la dinàmica temporal (B= <i>Boca</i> , M= <i>Mig</i> , C= <i>Cua</i>).	192
Figura 5.2. Cilindre mostrejador de biomassa macroalgal (àrea interna $500\ cm^2$).	193
Figura 5.3. Foto i característiques de les dues espècies de macroalgues bentòniques que han colonitzat recentment la badia dels Alfacs.	194
Figura 5.4. Distribució i cobertura de les macroalgues a la badia dels Alfacs: (a) possible extensió i distribució de la cobertura de les macroalgues bentòniques en 1987 a la cubeta central, a partir d'observacions puntuals durant l'anterior projecte de recerca a la badia dels Alfacs (J. Romero, <i>com, pers.</i>), (b) cobertura bentònica conjunta de les dues espècies de macroalgues <i>Caulerpa prolifera</i> i <i>Alsidium corallinum</i> en 1997.	195
Figura 5.5. Biomassa de macroalgues ($g\ PS\ m^{-2}$) a l'Abril de 1997: (a) cloròfit laminar <i>Caulerpa prolifera</i> , (b) rodòfits ramificats, fonamentalment <i>Alsidium corallinum</i>	196
Figura 5.6. Evolució temporal de la biomassa de macroalgues en cadascuna de les estacions de mostreig de la dinàmica temporal (veure Figura 5.1): (a) <i>Caulerpa prolifera</i> , (b) Rodòfits	

- ramificats, fonamentalment *Alsidium corallinum*, i ocasionalment amb escassa contribució d'acúmuls barrejats de *Gracilaria verrucosa*..... 197
- Figura 5.7. Histogrames de freqüències de temperatures mínimes de l'aire corresponents als mesos d'hivern (desembre-març). La moda de la distribució s'indica amb una punta de fletxa. Les dades procedeixen de l'observatori meteorològic d'Amposta-DARP. Unes temperatures de l'aire de 3.7 i 8.6 °C correspondrien a una temperatura d'aigua fonda de 10 i 13.6 °C, respectivament..... 200
- Figura 5.8. Incubacions fotosíntesi-irradiància al laboratori: (a) Arcó incubador amb les ampolles dels experiments de fotosíntesi irradiància. Les diferents irradiàncies s'aconsegueixen per distribució en zones amb il·luminació diferencial dins l'arcó i per l'addició de filtres reductors de la irradiància a sobre de les ampolles que així ho requereixen. (b) Detall de les ampolles d'incubació, oxímetre i agitador magnètic portàtil de camp i laboratori. El filament sobre la taula correspon a *Alsidium corallinum*. 209
- Figura 5.9. Esquema de l'extinció de la llum en fondària primer i en funció de la biomassa de la mata algal després, amb les equacions emprades. Les dimensions de la columna d'aigua i de les macroalgues no estan fetes a la mateixa escala. I_z = irradiància subaquàtica ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) a la fondària z (m), I_{z0} = I_z subsuperficial, K_z = coeficient d'extinció de la llum a la columna d'aigua, I_b = irradiància subaquàtica després de travessar una capa de macroalgues bentòniques de biomassa B (g PS m^{-2}), I_{b0} = I_b just abans de travessar la capa de macroalgues, K_b = coeficient d'extinció de la llum en funció de la biomassa macroalgal, H = alçada sobre el sediment (unitats arbitràries). 211
- Figura 5.10. Campanes d'incubació de sediment (disseny propi). La campana s'enterra fins a una cota de 5cm de fondària del cilindre rigid, amb l'ajut de les nanses laterals que porta acoblades. El volum tancat al seu interior per aquest procés és d'11 l i la superfície plana és de 755 cm^2 . El con de PVC flexible permet que el corrent marí pugui moure l'aigua tancada en el seu interior trencant els possibles gradients que s'hi poguessin formar eventualment..... 213
- Figura 5.11. Exemple de corba fotosíntesi irradiància (F-I). Cada punt és el promig de 3 rèpliques. (A) *Caulerpa prolifera*, (B) *Alsidium corallinum*. 215
- Figura 5.12. Evolució dels paràmetres fotosintètics de les corbes F-I i de les taxes de respiració mesurades: (a) Taxa de producció màxima, P_m^{mac} , (b) Irradiància de saturació, I_{sat} , (c) Irradiància de compensació per l'O₂, I_c , (d) Respiració per unitat de biomassa, R_b . ($1\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} = 1\mu\text{mol fotons m}^{-2} \text{s}^{-1}$). 216
- Figura 5.13. Coeficient d'extinció de la llum en fondària (K_z , en m^{-1}) emprada per al càlcul de balanços d'oxigen anuals i de finals d'estiu. Es mostren les mitjanes mensuals (\pm error estàndard) per cada una de les tres estacions de mostreig (*Boca*, *Mig* i *Cua*)..... 217
- Figura 5.14. Irradiància instantània subaquàtica al llarg de 1997: (a) sobre la mata de macroalgues, (b) sota la mata. També es presenta el percentatge d'irradiància aèria superficial ($\%I_0$) que arriba: sobre la mata de macroalgues, (d) sota la mata. Per aquests càlculs s'ha pres una biomassa mitjana per a l'estació *Cua* de 100-300 g PS m^{-2} de mata macroalgal, amb una $K_b = 2.74 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \text{g}^{-1} \text{PS}$ (veure més detalls en el text). 217

- Figura 5.15. Nombre d'hores d'exposició a llum saturant, H_{sat} al llarg de 1997, a la fondària de la mata macroalgal $z = 5.5$ m a l'estació *Mig*: (a) nombre d'hores d'exposició al dia per *Caulerpa prolifera*, i (b) el seu percentatge de dies de l'any corresponent a cada H_{sat} , (c) nombre d'hores d'exposició al dia per *Alsidium corallinum*, i (d) el seu percentatge de dies..... 218
- Figura 5.16. Producció Primària Bruta (PPB_{mac}) i Respiració (R_{mac}) de les dues macroalgues bentòniques dominants al llarg de 1997: (a) estació *Boca*, (b) estació *Mig*, (c) estació *Cua*. Les línies de punts a $PPB_{mac}=0$ han estat dibuixades com a referència únicament. 219
- Figura 5.17. Relació entre la respiració teòrica i la respiració observada per diferents mesos del període de mostreig: (a) 07/03/97, (b) 24/04/97, (c) 11/06/97, (d) 07/07/97, (e) 01/10/97, (f) 16/02/98, (g) 17/09/98. La primera prové de multiplicar a la biomassa de les campanes la respiració trobada a laboratori. La respiració observada correspon al consum d'oxigen trobat in situ amb les campanes d'incubació de sediment. Unitats: $mgO_2 m^{-2} h^{-1}$. Els punts d'intersecció a l'eix de les ordenades es mostren a la Taula 5.5..... 221
- Figura 5.18. Contribució de les macroalgues al balanç net diari bentònic i risc d'anòxia per un dia-tipus de setembre, en funció de la nuvolositat i de la terbolesa de l'aigua a l'estació de *Cua*. Els codis dels nivells d'irradiància incident corresponen a: I1 = aigua clara ($k_z = 0.3 m^{-1}$) + sense núvols (0 %); I2 = aigua clara ($k_z = 0.3 m^{-1}$) + màxima nuvolositat (50 %); I3 = aigua mig tèrbola ($k_z = 0.45 m^{-1}$) + nuvolositat mitjana (25 %); I4 = aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 m^{-1}$) + sense núvols (0 %); I5 = aigua molt tèrbola ($k_z = 0.6 m^{-1}$) + nuvolositat màxima (50 %). Les intensitats de gris de fons indiquen el nombre de dies que s'ha de mantenir la mateixa situació per que l'aigua es torni anòxica (veure text per més detalls). 224
- Figura 6.1. Esquema del model de balanços d'oxigen per a la badia dels Alfacs: (a) termes de què depèn la velocitat de canvi de l'OD, (b) representació esquemàtica del model conceptual OMMEL sobre un tall longitudinal de la badia..... 247
- Figura 6.2. Concentració d'oxigen observada vs. esperada a 1997, en (a) la capa superior i (b) la capa del fons de l'estació *Mig* de la badia dels Alfacs..... 253
- Figura 6.3. Evolució al llarg de l'any 1997 de la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua fruit de la simulació del model de balanços, i contribució parcial de cada procés al balanç horari d'oxigen en les estacions *Boca* (a, d), *Mig* (b, e) i *Cua* (c, f): (a, b, c) concentració d'oxigen dissolt ($mg l^{-1}$) a la capa superior (línia ratllada) i capa de fons (línia contínua), (d, e, f) contribucions parcials al balanç horari d'oxigen a la columna d'aigua ($mg l^{-1} h^{-1}$). Els valors corresponents a productors primaris indiquen producció neta. Cal notar que en alguns mesos concrets la simulació pot donar valors diferents dels reals, mentre que en altres l'ajust és molt millor (veure text per més detalls)..... 255
- Figura 6.4. Efecte del vent sobre el flux d'oxigen dissolt a través de la superfície de la columna d'aigua: (a) velocitat mitjana diària del vent ($m s^{-1}$), (b) velocitat mitjana horària del vent ($m s^{-1}$), (c) concentració d'oxigen dissolt (% de saturació) en l'estació de mostreig *Boca Superior*, (d), el mateix per *Mig Superior*, (e) el mateix per *Cua superior*, (f) velocitat de canvi horari de concentració d'oxigen dissolt ($mg l^{-1} h^{-1}$) a causa del vent en l'estació *Boca Superior*, (g), el mateix per *Mig Superior*, (h) el mateix per *Cua superior*. 256

- Figura 6.5. Evolució al llarg d'un dia mitjà de 1997 de la concentració d'oxigen dissolt de la columna d'aigua i de les contribucions parcials al balanç d'oxigen. Per a cada un dels sis punts de mostreig s'ha representat: (a-f) concentració d'oxigen dissolt ($\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) de la columna d'aigua (línia contínua fina) i concentració d'oxigen equivalent al 100% de saturació amb l'aire per la temperatura i salinitat donades (punts més gruixuts), (g-l) velocitat de canvi horari parcial de cada procés ($\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ h}^{-1}$), i (m-r) balanç net diari parcial de cada procés ($\text{mg O}_2 \text{ l}^{-1} \text{ d}^{-1}$). Els valors corresponents a productors primaris indiquen producció neta. 257
- Figura 6.6. Evolució del balanç d'oxigen en els mesos de setembre i octubre, per a l'estació Cua: (a) concentració d'oxigen dissolt (mg l^{-1}) a la capa superior (línia fina) i capa de fons (línia gruixuda), (b) irradiàncies just sobre l'aigua, per sota, al mig de la capa superficial, al mig de la capa profunda, i just sobre les macroalgues, de dalt a baix correlativament, (c) velocitat de vent (mitjana diària), (d) contribucions parcials al balanç horari d'oxigen a la columna d'aigua ($\text{mg l}^{-1} \text{ h}^{-1}$), (e) balanç net diari parcial d'oxigen a la capa superficial d'un dia mitjà de setembre (mg d^{-1}), (f) igual que (e) però per la capa profunda, (g)-(h) igual que (e)-(f) però per octubre. Les dades d'irradiància i velocitat del vent són mitjanes diàries. S'ha inclòs en (a), com a referència, una línia discontinua a 3 mg l^{-1} (llindar d'hipòxia)..... 259
- Figura 6.7. Sensibilitat de l'oxigen dissolt en l'estació *Mig* fons de la badia dels Alfacs a canvis del 20% en algunes funcions de forçament i paràmetres: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. 260
- Figura 6.8. Taxa de discrepància entre OD_{est} i OD_{obs} normalitzada per a l'increment del 20% en algunes funcions de forçament i paràmetres: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, inexistent per manca de dades (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. No s'ha dibuixat la subfigura (c) per que les dades per elaborar les figures corresponents al mes de setembre es van elaborar a partir de les dades recollides per la sonda multiparamètrica de micropolsos YSI 600 (veure 0), que en quedar lligada a un mort a prop del fons de la columna d'aigua, no va recollir dades al mateix moment de la capa superficial. En canvi, les subfigures (a) i (b) s'han elaborat a partir de les dades discretes setmanals obtingudes a partir de lectura amb l'oxímetre WTW sobre mostres capturades en ampolles Niskins, tant de la capa superficial com profunda. 261
- Figura 6.9. Taxa de canvi de l'oxigen dissolt en l'estació *Mig* fons de la badia dels Alfacs a causa de variacions en algunes funcions de forçament i paràmetres, dins el rang natural d'oscil·lació: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre, (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. 263
- Figura 6.10. Taxa de discrepància entre OD_{est} i OD_{obs} per variació dels valors d'algunes funcions de forçament i paràmetres, dins el seu rang natural d'oscil·lació: (a) capa superior de la columna d'aigua, considerant l'any sencer, (b) capa inferior, any sencer, (c) capa superior, setembre,

inexistent per manca de dades (d) capa inferior, setembre. Paràmetres ordenats de major a menor efecte, en valor absolut, per a la capa inferior de la columna d'aigua. La raó per la qual no existeixen dades per dibuixar la figura (c) està explicada a la Figura 6.8.	263
Figura 6.11. Concentració d'oxigen observada (creus) vs. estimada (línies) entre el 16 i 19 de setembre de 1997 en capa profunda de l'estació <i>Mig</i> de la badia dels Alfacs. Es mostra l'evolució estimada de l'OD sense calibrar expressament cap paràmetre respecte els valors emprats per a la simulació de tot l'any 1997 (línia grisa contínua), i amb els valors calibrats de respiració del sediment, concentració de clorofil·la a i fluxos d'aigua dolça ($r_{sed} \cdot 1.84$, $Cl.a \cdot 0.16$, $F3_{canals} \cdot 1.26$). Resultat pràcticament idèntic s'obté calibrant per als dos paràmetres $r_{sed} \cdot 1.67$ i $Cl.a \cdot 0.21$ només (veure text per més detalls).....	269
Figura 6.12. Esquema de la dinàmica anual d'oxigen dissolt a la badia dels Alfacs: (a) hivern, (b) primavera, (c) estiu, i (d) tardor. La mida dels símbols és arbitràriament proporcional a la seva magnitud, o a la contribució al balanç d'oxigen dissolt. Els símbols representats per al plàncton no tenen per què coincidir amb cap espècie concreta del grup taxonòmic general al que representen. Veure text per més detalls.	275
Figura 6.13. Distribució de freqüències de producció primària particulada per (a) fitoplàncton, i per (b) fitoplàncton més fanerògames, macroalgues i microfítobentos, en varies llacunes, estuaris i aigües costaneres. Modificat de Nixon (1986). S'ha inclòs l'asterisc (" * ") sobre la classe de freqüència on es situa la producció de la Badia dels Alfacs.	278
Figura 6.14. Producció primària total a 32 zones marines costaneres (referències en parèntesis). Modificat de Borum 1996: (1) Elmgren 1984, (2) Jassby <i>et al.</i> 1993, (3) Nienhuis 1992, (4) Welsh <i>et al.</i> 1982, (5) Richardson i Christoffersen 1991, Granéli i Sundbäck 1986, (6) Thom 1984, (7) Day <i>et al.</i> 1973, (8) Borum <i>et al.</i> 1990, (9) Kemp <i>et al.</i> 1983, (10) Winter <i>et al.</i> 1975, (11) Jensen <i>et al.</i> 1990, (12) Walker <i>et al.</i> 1988, (13) Lively <i>et al.</i> 1983, (14) Murray i Wetzel 1987, (15) Mann 1972.....	279
Figura B.1 Localització de Skagerrak, Kattegat, Mar de Belt i Mar Bàltic, Europa del Nord (a partir de Anderson i Rydberg 1988).	320
Figura B.2. Localització del fiord de Trondheim, a la part central de Noruega (a partir de Öztürk <i>et al.</i> 2002)	321
Figura B.3. Localització del fiord Doubtful Sound, Nova Zelanda (a partir de Lusseau <i>et al.</i> 2003) ..	322
Figura B.4 Localització de la badia de Chesapeake i dels seus estuaris, Virginia, EUA (a partir de Harding 1994).....	323
Figura B.5 Localització de la badia de Tomales, Califòrnia, EUA (a partir de Smith i Hollibaugh 1997).	325
Figura B.6 Localització de la badia de Tampa, Florida, EUA (a partir de Wang <i>et al.</i> 1999).	326
Figura B.7 Localització dels estuaris mediterranis d'Àustràlia Occidental, Austràlia (a partir de Largier <i>et al.</i> 1996, Hearn 1998).....	327
Figura B.8 Localització de l'estuari de Palmiet, Sud-àfrica (a partir de Largier i Taljaard 1991).	328
Figura B.9 Localització de la badia portuària de Tolo, Hong Kong, Xina (Hodgkiss i Yim 1995).	330
Figura B.10 Localització de la badia d'Uranouchi, Shikoku, Japó (a partir de Somsueb <i>et al.</i> 2001). 331	

Figura C.1. Articles amb citacions d'episodis anòxics o hipòxics en ambients estuaris costaners	338
Figura C.2. Diagrama de freqüències amb el nombre d'observacions cada any, per a totes les observacions descrites a Kamykowski i Zentara (1990).....	339
Figura D.1. OMMEL Home page at Sourceforge.net, the main portal to produce and find free software on the net. URL for OMMELproject: http://sourceforge.net/projects/ommel	350
Figura D.2. OMMEL File tree, including the folders for binaries, input files, output files, R_scripts, Fortran source, and others. See text for more details.....	351
Figura D.3. OMMEL dialog in a shell windows under GNU/Linux.....	352
Figura D.4. OMMEL dialog in a shell windows under MS Windows	352
Figura D.5. Editing "R" scripts to produce graphs upon OMMEL results, using RKWard under GNU/Linux.....	362
Figura D.6. Editing "R" scripts to produce graphs upon OMMEL results, using SciViews and Tinn-R under MS Windows.....	363

Annex F. Llistat de Taules

Annex F. Llistat de Taules

Taula 1.1 Resum de circulació estuariana per als diferents tipus d'estuaris ¹ (segons classificació de Pritchard 1955, Cameron i Pritchard 1965; modificat a partir de Friedrichs 2002b).....	17
Taula 1.2 Característiques morfològiques de la Badia dels Alfacs.....	22
Taula 1.3 Fluxos d'aigua estimats per a cada zona, en canals oberts i canals tancats, en m ³ s ⁻¹ . C. Ala: Canal de la Sèquia de l'Ala. C. Enc: Canal de l'Encanyissada. C. Dgl: Canal del Desguàs General o Campredó. C.Dep.: Canal de la Depuradora de Sant Carles de la Ràpita. Dades de fluxos dels arrossars amb <i>canals oberts</i> : Canicio i Ibáñez (1996); i amb <i>canals tancats</i> : Camp (1994). Cal remarcar que no són sempre fluxes reals a través d'aquests canals, que de vegades són fins i tot secs, sinó entrades per cada terç arbitrari de ribera nord de la badia, a la qual s'ha anomenat amb el nom del canal més important que hi té a dins.	24
Taula 1.4 Especificacions de les variables mesurades pel correntímetre AANDERAA RCM7.....	30
Taula 1.5 Valors acumulats anuals i per estacions climatològiques de: Precipitació (PPT), Evapotranspiració (Eto) i Precipitació neta (PPT-Eto). Les dades són de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP. Les unitats són mm, ó l m ⁻² , i la majoria són mitjanes de prop de 90 casos, menys l'hivern de 1992, en que tan sols es diposa de 45 casos.....	44
Taula 1.6 Correlacions entre les components del corrent en boca fons i les variables meteorològiques. Calculat com a exemple amb les dades de novembre – desembre de 1998. Es mostren en negreta i ombrejades les correlacions lineals estadísticament significatives (p<0.05).....	45
Taula 1.7 Resum de l'ordre de magnitud (observat o previsible) del flux net residual diari (expressat en m ³ s ⁻¹ , ó en x10 ⁶ m ³ d ⁻¹) de la Badia dels Alfacs. Es dona el valor mínim i màxim observat o estimat, segons cada cas.....	53
Taula 2.1 Projectes d'investigació d'on procedeixen les dades que s'han analitzat en la present tesi. 69	
Taula 2.2 Variables meteorològiques per a la zona de la badia dels Alfacs. Dades de l'estació meteorològica del municipi d'Amposta (40° 42' 24" N, 00° 37' 48" E).	70
Taula 2.3 Variables físico-químiques de l'aigua obtingudes en cada projecte emprades en aquesta tesi doctoral.....	71
Taula 2.4 Factors de conversió entre els sensors de llum de l'estació meteorològica d'Amposta-DARP i els del LICOR LI-1000 manual. La calibració entre piranòmetres es va realitzar a l'estació meteorològica d'Amposta-DARP el 27/01/99, en un dia molt ventós i cobert de núvols grisos, mentre que les altres mostrades aquí es van fer en una bassa d'aigua en els camps experimentals de la Facultat de Biologia (UB) els dies 11-12/06/98, en dies clars. Totes tres regressions són estadísticament significatives (p<0.05).	72
Taula 2.5 Salinitats mitjanes mensuals (psu) de la Badia dels Alfacs entre 1990 i 1998.....	74

Taula 2.6 Rang de valors de les variables climatològiques per tot el període 1992-1999 i correlació amb el temps en dies. Les dades originals procedeixen de l'observatori d'Amposta del Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca de la Generalitat de Catalunya.	76
Taula 2.7 Regressions lineals de les salinitats (en psu) de la capa superficial i profunda respecte el temps (en dies), a partir de les dades mostrades en la Taula 2.5.	86
Taula 2.8 Temperatures mínimes mensuals i anuals (C) de l'aigua de la capa fonda de la badia dels Alfacs entre 1990 i 1998.	87
Taula 2.9 Increments estimats de la temperatura (C) de l'aigua més fonda de la badia dels Alfacs (a 6m de fondària, en contacte amb la comunitat bentònica de l'ecosistema). Calculat a partir de la tendència d'increment de la temperatura mínima diària de l'aire (Taula 2.6) i de la correlació entre la aquesta i la temperatura de l'aigua de 6m de fondària (Figura 2.14).	88
Taula 2.10 Tendències temporals dins de la sèrie de concentració de nutrients entre 1991 i 1994 ⁵ . Es mostren els paràmetres de l'equació ($Y=Y_0+aX$) de les regressions estadísticament significatives: terme independent (Y_0), pendent de la recta (a), el coeficient de correlació (r), i el grau de significació (* quan $p<0.05$, ** quan $p<0.01$, *** quan $p<0.001$). Unitats: nutrients en μM , Clorofil·la a en mg m^{-3} , temps en dies. El fosfat del període 1991-1993 no s'ha inclòs en l'anàlisi (veure text per més detalls).	94
Taula 2.11 Anàlisi de les concentracions de nutrients (μM), la taxa N/P i la concentració de clorofil·la a (Cla, mg m^{-3}) amb el temps, en la columna d'aigua de la badia dels Alfacs entre 1986 i 1997. Dades de diverses procedències ($n=344$, veure text per més detalls). S'han ombrejat els valors estadísticament significatius ($p<0.05$).	94
Taula 2.12 Concentracions de Clorofil·la a mitjanes mensuals (mg m^{-3}) entre 1990 i 1995. Dades del Centre Nacional d'Aqüicultura-IRTA.	95
Taula 2.13 Test no paramètric de Kolmogorov-Smirnov de comparació de les mitjanes per als dos casos de "període de mostreig", aplicat a les concentracions de nutrients (μM) i la taxa N/P analitzades en l'aigua dels canals de desguàs dels arrossars i de la principal llacuna costanera que vessa a la badia dels Alfacs (Sèquia de l'Ala, Desguàs General i Sortida de la llacuna de l'Encanyissada). NID: Nitrogen inorgànic dissolt. Resultats ombrejats són estadísticament significatius, amb nivell de significació: * quan $p<0.05$, ** quan $p<0.01$, *** quan $p<0.001$	103
Taula 2.14 Test no paramètric de Kolmogorov-Smirnov de comparació de les mitjanes per als dos casos de "canal que travessa llacuna vs. canal que no en travessa", aplicat a les concentracions de nutrients (μM) i la taxa N/P analitzades en l'aigua dels canals de desguàs dels arrossars i de la principal llacuna costanera que vessa a la badia dels Alfacs (Sèquia de l'Ala, Desguàs General i Sortida de la llacuna de l'Encanyissada). Resultats ombrejats són estadísticament significatius, amb nivell de significació: * quan $p<0.05$, ** quan $p<0.01$, *** quan $p<0.001$	104
Taula 2.15 Concentracions de nutrients del canal de sortida de la depuradora.	104
Taula 2.16 Concentracions de Clorofil·la a en diferents estuaris (modificat a partir de Underwood i Kromkamp 1999 i altres fonts).	110
Taula 4.1 Canvi diari de concentració d'oxigen dissolt (OD). Es mostren els OD inicial i final (OD_i i OD_f , respectivament), l'increment d'OD (ΔOD), l'interval de temps considerat (t), el canvi net	

planctònic (CNP), la concentració de la clorofil·la a (Cla), i la productivitat bruta del plàncton ($PB_m^{Cl.a}$) ^v del període estudiat.....	162
Taula 4.2 Decrement d'oxigen dissolt ($mg\ O_2\ l^{-1}\ h^{-1}$) mitjà entre la concentració de mitja tarda i la de la matinada del dia següent de totes les dades disponibles per a cada compartiment. Dades procedents del període entre 09/96 i 09/97.	162
Taula 4.3 Càlcul de la demanda d'oxigen de la columna d'aigua, per estimar l'ordre de magnitud de la respiració del plàncton (R_{pic}), a partir de mesures de demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO_5), suposant consum constant. Es mostra la temperatura de les dues incubacions i la de camp (t_1 , t_2 , t_{camp} , respectivament), i les seves DBO_5 respectives (DBO_{5t_1} , DBO_{5t_2} , DBO_{5t_c}).	163
Taula 4.4 Velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial: es mostra l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), i el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}).....	166
Taula 4.5 Càlcul del flux d'oxigen provocat per l'aireig del vent, FDO_{vent} (segons Wanninkhof 1992). V.v.: velocitat del vent a 10 m d'altura (estàndard de les estacions meteorològiques). i.t.: interval de temps. Sc: Número de Schmidt. K: coeficient de transferència de l'oxigen dissolt.	167
Taula 4.6. Concentració de carboni orgànic dissolt (COD) i carboni orgànic particulat (COP) a la columna d'aigua de la badia dels Alfacs en gener de 1997 i setembre de 1998. Els codis corresponen als del llistat de la Figura 4.2.....	171
Taula 4.7 Correlacions parcials entre consum d'oxigen dissolt (OD), estimat a través del canvi de concentració del carboni orgànic dissolt (COD) més carboni orgànic particulat (COP), i a través de la demanda bioquímica d'oxigen en 5 dies (DBO_5) observada. S'ha assumit la relació estequiomètrica molar entre carboni i oxigen de 1:1. Incubacions a 15 ° C.....	172
Taula 4.8 Estimes de producció bruta del plàncton (PPB_{pic}), velocitats de canvi parcials de concentració d'oxigen dissolt a la columna d'aigua en la capa superficial i percentatges parcials relatius a la PPN_{pic} (% PPN_{pic}). Les altres variables mostrades són l'oxigen dissolt (OD), el canvi net planctònic (CNP), el flux per l'aireig del vent (FOD_{vent}), el flux per hidrodinamisme (FOD_{hid}), la producció primària neta del plàncton (PPN_{pic}), la respiració del plàncton (R_{pic}). Les últimes tres columnes fan referència al percentatge de la PPN_{pic} que significa el valor de flux a causa del vent (Vent), hidrodinamisme (Hid) i respiració del plàncton (R).	175
Taula 4.9 Productivitat del plàncton ($PB_m^{Cl.a}$ i $PN_m^{Cl.a}$), a partir d'estimes de producció bruta (PPB_{pic}) i neta (PPN_{pic}), respectivament, i la concentració de clorofil·la a (Cla), per a cada estació climatològica.....	176
Taula 4.10 Recull de productivitats del fitoplàncton ($P_m^{Cl.a}$), convertides ¹ a mgO_2 ($mg\ Cl.a$) ⁻¹ h^{-1} . Les produccions descrites en els treballs (Prod.) fan referència a produccions netes (N), brutes (B) o sense especificar en la referència ("?"), així com també ha passat amb la descripció del metodologia, que no ha pogut ser esbrinada en tots els casos ("?").	182
Taula 5.1. Coeficients dels polinomis de 3r ordre que descriuen la dinàmica temporal de biomassa de les dues espècies de macroalgues, per compartiments. La funció general és $B(T) = B_{m\acute{a}x} (B_0 + aT + bT^2 + cT^3)$	197

Taula 5.2. Percentatge de dies en què la temperatura mínima de l'aire és igual o inferior del valor crític de 3.7 °C. El període d'hivern inclou els mesos de desembre a març.....	201
Taula 5.3. Irradiància subaquàtica (I_b) que travessa la mata de rodòfits ramificats en funció de la seva biomassa acumulada (Biom), per a diferents nivells d'irradiància incident a sobre seu. Per al seu càlcul s'ha fet servir el coeficient d'extinció de la llum respecte la biomassa algal de $+0.00274 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1} \text{ PS}$	218
Taula 5.4. Balanç d'oxigen de les macroalgues. Calculat amb les estimes de producció primària neta i respiració de les macroalgues, a partir de les mitjanes estacionals sobre els valors representats a la Figura 5.16.	220
Taula 5.5. Respiració estimada del sediment nu, sense macroalgues. Aquests resultats provenen de regressions lineals de les dades mostrades a la Figura 5.17.....	222
Taula 5.6. Balanç global d'oxigen del bentos, incloent la contribució de les macroalgues i del sediment. Els valors de producció neta bentònica provenen de les estimes de producció primària neta per a les macroalgues (mitjanes estacionals a partir dels valors de la Figura 5.16) més les estimes de la respiració del sediment nu de cada estació climatològica a partir dels valors de la Taula 5.5.	223
Taula 5.7. Reducció total de la irradiància (%) en funció de la biomassa macroalgal (g PS m^{-2}) per a cada escenari lumínic. Aquesta reducció s'ha calculat amb el quocient entre la irradiància PAR sota les macroalgues i la Irradiància PAR aèria sense núvols. Els codis I1 a I5 dels escenaris d'irradiància són els explicats en el text i en la Figura 5.18.....	223
Taula 6.1. Paràmetres, funcions de forçament i principals variables calculades. (Llegenda de codis emprats en els gràfics i taules d'aquest capítol).	246
Taula 6.2. Dimensions de la badia considerades en els càlculs.....	248
Taula 6.3. Contribució parcial d'entrada o sortida d'oxigen a la badia dels Alfacs per cada procés involucrat en el balanç (la part superior en $\text{mg O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, la part inferior en % respecte el total de guanys i pèrdues per separat). Les dades referents a macroalgues provenen de les zones específiques on hi creixen, però s'han expressat aquí respecte m^2 total de la badia i no només respecte el m^2 del lloc on hi creixen. Explicació dels codis a la Taula 6.1.	251
Taula 6.4. Índex Producció Bruta : Respiració (PB:R) del plàncton i bentos de la badia dels Alfacs. 260	
Taula 6.5. Rang natural de variació de tot un any per un costat, i del mes de setembre en concret, per l'altre, de determinats paràmetres ecològics (<i>funcions de forçament</i> en el model). Veure unitats i descripció dels codis de les variables a la Taula 6.1. A la columna observacions s'ha inclòs el capítol de la tesi d'on surten les dades emprades aquí. PN = Producció neta, PB = Producció bruta.	262

Annex G. Nota legal de la tesi doctoral

Annex G. Nota legal de la tesi doctoral

G.1. Llicència de Copyright

Aquesta tesi es troba sota als termes de la llicència de Copyright: "**Reconeixement-CompartirIgual 2.5 Espanya**" de Creative Commons, excepte en els llocs on es diu explícitament el contrari.

Copyright 2007 Xavier de Pedro Puente



Reconeixement-CompartirIgual 2.5 Espanya - <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/>



Sou lliure de:

- copiar, distribuir i comunicar públicament l'obra
- fer-ne obres derivades
- fer un ús comercial de l'obra

Amb les condicions següents:



Reconeixement. Heu de reconèixer els crèdits de l'obra de la manera especificada per l'autor o el llicenciador.



Compartir amb la mateixa llicència. Si altereu o transformeu aquesta obra, o en genereu obres derivades, només podeu distribuir l'obra generada amb una llicència idèntica a aquesta.

- Quan reutilitzeu o distribuïu l'obra, heu de deixar ben clar els termes de la llicència de l'obra.
- Alguna d'aquestes condicions pot no aplicar-se si obteniu el permís del titular dels drets d'autor.

Els drets derivats d'usos legítims o altres limitacions reconegudes per llei no queden afectats per l'anterior

Això és un resum fàcilment llegible del text legal (la llicència completa), accessible aquí: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5/es/legalcode.ca>

G.2. Clàusula d'ús no militar

"Queda absolutament prohibida la utilització, recerca i desenvolupament, de manera directa o indirecta, de qualsevol de les aportacions científiques pròpies de l'autor que es presenten en aquesta memòria, per part de qualsevol exèrcit del món o per part de qualsevol grup armat, per a qualsevol ús militar i per a qualsevol altre ús que atempti contra els drets humans o contra el medi ambient, si no és amb el permís escrit de totes les persones del món."

English:

"It is strictly prohibited to use, to investigate or to develop, in a direct or indirect way, any of the scientific contributions of the author contained in this work by any army or armed group in the world, for military purposes and for any other use which is against human rights or the environment, unless a written consent of all the persons in the world is obtained"

Més informació:

<http://www.prouinvestigacionmilitar.org/clausula.htm>



**FpP: c/ Casp, 31, 2n 1a A - 08010 Barcelona - info@fundacioperlapau.org -
Tel. 93 302 51 29**